REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTERE DE L'INDUSTRIE, DE L'ENERGIE ET DES P.M.E.

Règlementation Thermique et Energétique
Confort Thermique et Economie d'Energie

REGLEMENTATION THERMIQUE ET ENERGETIQUE
DES BATIMENTS NEUFS EN TUNISIE

Label résidentiel

INITIATION A LA REGLEMENTATION THERMIQUE ET ENERGETIQUE DES LOGEMENTS NEUFS

$$= \lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

Version novembre 2005

ANME
GEF FONDS POUR L'ENVIRONNEMENT MONDIAL
FFEM Fonds Français pour l'Environnement Mondial

REGLEMENTATION THERMIQUE ET ENERGETIQUE
DES BATIMENTS NEUFS EN TUNISIE

Label résidentiel

INITIATION A LA REGLEMENTATION THERMIQUE ET ENERGETIQUE DES LOGEMENTS NEUFS

Version novembre 2005

ANME

Fonds Français pour l'Environnement Mondial

FONDS POUR L'ENVIRONNEMENT MONDIAL
GEF

Label résidentiel

INITIATION A LA REGLEMENTATION THERMIQUE ET ENERGETIQUE DES LOGEMENTS NEUFS

Sommaire

Préambule 5

Introduction 7

Première Partie : Notions de thermique des bâtiments 9

Chapitre 1 : Transmission de la chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment 11

1.1 Modes de transfert thermique dans le bâtiment
1.2 Déperditions de l'enveloppe en régime permanent
1.3 La ventilation des locaux

Chapitre 2 : Caractéristiques d'une paroi en régime variable 29

2.1 Le régime variable
2.2 Caractéristiques dynamiques des parois en régime périodique
2.3 Le pouvoir isolant des matériaux de construction
2.4 Les matériaux et l'inertie
2.5 Isolation et inertie

Chapitre 3 : Apports gratuits et besoins énergétiques 41

3.1 Apports bruts, apports utiles et apports effectifs
3.2 Les apports internes
3.3 Les apports solaires
3.4 Les besoins énergétiques

Chapitre 4 : Evaluation des bâtiments non conditionnés 51

4.1 Principe d'un indicateur basé sur le confort
4.2 Facteurs influant sur le confort
4.3 Vote moyen prévisible et note de confort
4.4 Enquête sur la population tunisienne

Deuxième Partie : La Réglementation thermique et énergétique tunisienne 61

Chapitre 5 : Le contexte tunisien 63

5.1 Caractéristiques climatiques générales
5.2 Zonage climatique
5.3 Les stratégies de conditionnement en Tunisie

Chapitre 6 : Le processus réglementaire et les études préparatoires 73

6.1 Nécessité de la réglementation
6.2 Nature de l'exigence réglementaire
6.3 Le processus de préparation de la réglementation
6.4 Résultats des études préparatoires et recommandations
6.5 Choix des paramètres de conception

Chapitre 7 : Calcul des apports solaires bruts 91

7.1 Irradiation sur différents plans verticaux
7.2 Calcul des facteurs d'ombrage
7.3 Apports solaires bruts à travers une fenêtre
7.4 Apports solaires bruts à travers une paroi opaque
7.5 Synthèse du calcul des apports solaires

Chapitre 8 : Méthode CHEOPS pour le calcul des besoins énergétiques 103

8.1 Constante de temps des bâtiments
8.2 Besoins en énergie de chauffage pour T_{cc} = 20°C
8.3 Besoins en énergie de climatisation
8.4 Besoins en énergie de chauffage pour T_{cc} = 16°C
8.5 Calcul des coefficients réglementaires

Références bibliographiques 118

Préambule

Ce manuel à été élaboré par Mme Nadia GHRAB - MORCOS, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) pour le compte de l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME) dans le cadre de la mise en place de la réglementation thermique et énergétique des bâtiments neufs en Tunisie en vue d'améliorer le confort thermique à l'intérieur de ces bâtiments et de maîtriser la consommation d'énergie.

L'objectif de ce manuel est de familiariser les professionnels du bâtiment (architectes, bureaux d'études, promoteurs et agents de contrôle) avec cette réglementation afin qu'ils en connaissent les principes, le processus qui a conduit à son élaboration et sa mise en application.

Introduction

L'analyse du bâti traditionnel en Tunisie montre qu'un confort de qualité y est assuré en saison chaude. Par contre, en saison froide, l'ambiance thermique de ces constructions est beaucoup moins satisfaisante, du moins en ce qui concerne le mode de vie contemporain. Durant les dernières décennies, nous sommes passés d'une architecture traditionnelle qui avait su développer un savoir-faire empirique pour se protéger des rigueurs du climat extérieur, à une architecture moderne de qualité insuffisante sur le plan thermique. Les maîtres d'ouvrage et les usagers pallient la mauvaise qualité du bâtiment (pas d'isolation, étanchéité très insuffisante, ponts thermiques...) par des équipements fortement consommateurs d'énergie: le chauffage central se généralise de plus en plus et l'usage des climatiseurs tend à augmenter. L'usage massif de tels équipements serait dangereux pour le bilan énergétique de la Tunisie et entraînerait une pollution significative.

Cependant, le climat tunisien est relativement tempéré.
S'il est vrai qu'il existe des besoins de chauffage et aussi des besoins de refroidissement selon les saisons, le climat offre les moyens de les satisfaire de manière naturelle, à peu de frais. Il est donc inacceptable de continuer à construire des enveloppes de faibles performances, et de consentir des consommations d'énergie relativement élevées pour réaliser le confort, alors que des solutions beaucoup moins onéreuses existent. Mais la mutation vers une qualité de construction améliorée ne se fait généralement pas spontanément.

C'est de l'ensemble de ces considérations qu'est née **l'idée de mettre en place une réglementation thermique et énergétique des bâtiments neufs.**

La première phase de ce projet a démarré en 1991. Au cours de cette phase, nous avons effectué des travaux préparatoires, concernant :

- Le découpage du Maghreb en zones climatiques.
- La sélection de décades typiques (sur le plan climatique) pour chaque mois et chacune des cinq localités considérées.
- La construction de diagrammes de confort appropriés pour différents types de bâtiments (suivant la saison, l'activité et la vêture des occupants).
- Les propriétés thermophysiques des matériaux de construction couramment utilisés.

Le rapport relatif à cette première phase [9] rassemble l'ensemble des résultats de ces travaux.

La deuxième phase (1997 - 2000) avait pour objectifs:

- Analyser de manière approfondie, les performances thermiques et énergétiques de logements (dits de référence), représentatifs du parc actuel construit, dans des situations réelles d'occupation.
- Evaluer l'amélioration des performances qui peut être obtenue moyennant l'introduction d'une ou plusieurs mesures d'amélioration.
- Dégager des solutions proches de l'optimum technico-économique, et établir des recommandations à l'adresse des concepteurs.

On trouvera dans le rapport relatif à cette phase [11] une description de ces travaux.
L'un des aspects originaux de ce travail tient à la particularité du climat maghrébin qui suscite des besoins de chauffage l'hiver, et aussi de rafraîchissement l'été. Toute conception architecturale doit alors veiller à se concilier le climat durant les deux saisons. L'exigence réglementaire devra aussi concerner les deux situations, et partant, l'évaluation des performances des variantes étudiées, en saisons chaude et froide.

L'objectif de ce manuel est de familiariser les professionnels du bâtiment (architectes, bureaux d'études, promoteurs, agents de contrôle) avec cette réglementation, afin qu'ils en connaissent les principes, le processus qui a conduit à son élaboration et sa mise en application.

La première partie rassemble des notions de thermique des bâtiments. Le 1er chapitre traite de la transmission de la chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment, en régime quasi-stationnaire ; le deuxième présente les caractéristiques de l'enveloppe qui sont déterminantes en régime variable, le troisième aborde les apports gratuits et les besoins énergétiques compte tenu de ces apports, et le quatrième traite de l'évaluation des bâtiments non-conditionnés.

La deuxième partie se concentre sur le processus de la réglementation qui a été entrepris. Le cinquième chapitre présente les spécificités du contexte tunisien du point de vue climatique et du mode de gestion des bâtiments, le sixième présente le processus réglementaire et les principaux résultats des études qui l'ont étayé, le septième chapitre détaille le calcul des apports solaires bruts. Enfin le huitième chapitre définit les indicateurs de performance énergétiques retenus pour l'exigence réglementaire et le label, et explique leur mode de calcul.

Première Partie

Notions de thermique des bâtiments

Chapitre 1

Transmission de la chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment

Nous verrons au chapitre 8 que l'exigence réglementaire pour la première phase de la réglementation *(dite réglementation minimale)* sera basée sur deux indicateurs, l'un pour l'hiver et l'autre pour l'été, respectivement liés aux besoins de chauffage et de climatisation du bâtiment pour maintenir des températures de consigne.

Le maintien de la température du bâtiment à une valeur fixe, suppose que son bilan thermique soit nul. En d'autres termes, la somme des apports de chaleur doit compenser en saison froide les déperditions du bâtiment. En saison chaude, l'équipement de conditionnement doit retirer une quantité de chaleur exactement égale à la somme des flux qui pénètrent ou qui sont générés dans le bâtiment. C'est la raison pour laquelle l'estimation des besoins de chauffage ou de climatisation doit passer par le calcul des flux de chaleur à travers l'enveloppe (que nous appellerons *déperditions de l'enveloppe* par abus de langage), et par le calcul de la part des *apports gratuits* qui intervient dans le bilan du bâtiment.
Nous allons donc présenter rapidement ces différentes quantités.

1.1 Modes de transfert thermique dans le bâtiment

La conduction

C'est le seul mode de transfert de chaleur possible à l'intérieur d'un matériau solide opaque.
A l'intérieur d'un corps solide soumis à un gradient de température, il s'établit un flux de chaleur des points les plus chauds vers les points les plus froids, tendant à l'homogénéisation des températures de ce corps. En un point x donné, la densité de ce flux φ (x) est proportionnelle au gradient de température en ce point $\frac{\partial T}{\partial x}$, et à une propriété du matériau dite conductivité λ (loi de Fourier) :

$$\varphi(x) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \qquad (1.1)$$

Conduction de la chaleur en régime permanent

Si l'on impose des températures T_1 et T_2 constantes aux deux extrémités d'un matériau conducteur, il s'établit à l'intérieur au bout d'un certain temps, un phénomène de conduction indépendant du temps ; les températures ne varient plus : c'est le **régime permanent.**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

- **Conséquences du régime permanent**

La température en tout point n'évolue pas ; la matière ne stocke pas de chaleur ; elle sert seulement de véhicule à la chaleur. Le flux est constant de l'extrémité chaude à l'extrémité froide *(voir figure 1)*. La résolution de l'équation de la chaleur donne :

$$T(x) = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{e} x$$

avec
$T_1 > T_2$
e = épaisseur du matériau ou du mur.
Le profil de température est une droite.
La densité de flux de chaleur φ est donnée par :

$$\varphi = \frac{\lambda}{e}(T_1 - T_2) \qquad (1.2)$$

et cela en tout point x.

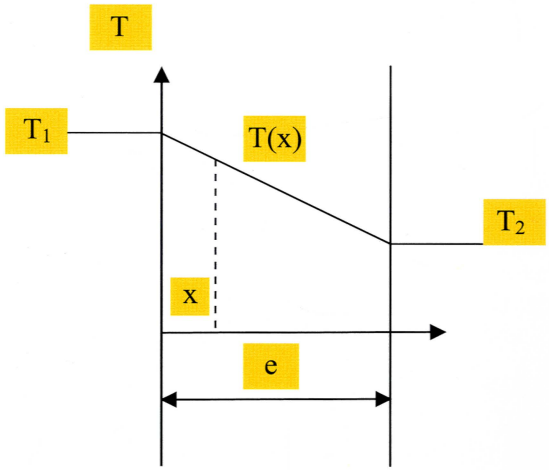


Figure 1.1 - Conduction en régime permanent

Conditions du régime permanent

Un mur ne peut se comporter comme simple conducteur passif du flux que si ce flux est fourni à l'extrémité chaude et est absorbé exactement à l'extrémité froide.

Cela suppose :

- Soit que ce flux soit fourni artificiellement *(chauffage ...)*
- Soit qu'un équilibre entre le mur et l'ambiance soit établi et ne soit pas modifié sensiblement durant un temps suffisamment long.

Si l'on est en régime permanent, et pour un flux monodimensionnel, la loi de Fourier s'exprime ainsi pour une surface donnée

$$T_1 - T_2 = R'Q \qquad (1.3)$$

Q étant le flux et R' la résistance totale.

Ou encore :

$$T_1 - T_2 = R\,\varphi \qquad (1.4)$$

R (en m²°C/W) étant la résistance de l'unité de surface de la paroi, et φ (W / m²) étant la densité de flux.

En comparant (1.2) et (1.4), on voit que : $R = \frac{e}{\lambda}$ (1.5)

Paroi multicouches

En appliquant l'analogie électrique, on voit qu'on est dans le cas de plusieurs résistances en série *(voir figure 1.2)*; on a donc :

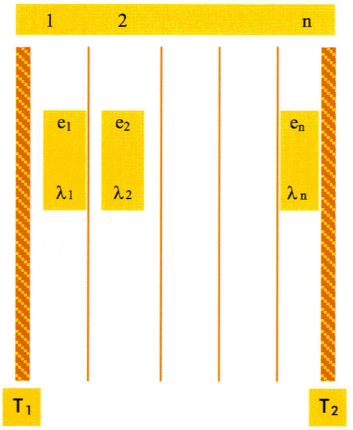


Figure 1.2 - Conduction dans une paroi multicouches

$$R_{cond} = \sum_{i=1}^{n} R_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{\lambda_i} \qquad (1.6)$$

R_{cond} étant la résistance des différentes couches à la conduction.
Si T_1 et T_2 sont respectivement les températures des **surfaces** de part et d'autre de la paroi, le flux Q à travers une surface *S* de cette paroi s'écrit :

$$Q = S \frac{T_1 - T_2}{R_{cond}} \qquad (1.7)$$

La convection

La convection intervient dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide en mouvement en contact avec cette paroi. En se déplaçant, les particules du fluide transfèrent une certaine quantité de chaleur.

Convection naturelle et convection forcée

- Si le mouvement des particules est dû à l'action des différences de température et des forces de pesanteur, on dit qu'il y a convection naturelle.
  Exemple : l'air au contact d'un radiateur.
- Lorsque le fluide est mis en mouvement par une pompe, un ventilateur, ou tout autre agent indépendant du solide et du fluide considérés, on dit qu'il y a convection forcée.
  Exemples : Soufflage d'air chaud dans une gaine de soufflage.
  Action du vent sur les parois externes d'un bâtiment

Loi générale de la convection

Que la convection soit naturelle ou forcée, on utilise généralement une loi simplifiée *(loi de Newton)* pour exprimer le flux de chaleur convectif :

$$Q_c = h_c S (T_s - T_f) \qquad (1.8)$$

où h_c = coefficient de transfert convectif sur la surface [W/m²°C]
S = aire de contact entre la paroi et le fluide [m²]
T_s = température de surface du solide [°C]
T_f = température du fluide loin de la paroi [°C]

En convection naturelle

Le coefficient de convection h_c dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'inclinaison de la paroi et de la direction du flux transféré:

- Pour une paroi verticale : le flux transféré est horizontal ; le coefficient h_c a une valeur moyenne *(de l'ordre de 4 ou 5 W/m²°C)*.
- Pour une paroi horizontale avec un flux descendant, le coefficient h_c est faible *(de l'ordre de 1 à 3 W/m²°C)*.
  Exemple : échange convectif sur un plancher d'une pièce chauffée, au-dessous de laquelle se trouve une cave non chauffée.
- Pour une paroi horizontale avec un flux ascendant, le coefficient h_c a une valeur élevée *(de l'ordre de 5 à 6 W/m²°C)*.
  Exemple : échange convectif avec un plancher chauffant.

En convection forcée

Le coefficient h_c dépend de la vitesse de l'air soufflé ; c'est le cas sur la surface extérieure des parois du bâtiment, où h_c dépend de la vitesse du vent.

Le rayonnement

Tous les corps émettent un rayonnement électromagnétique. L'intensité de ce rayonnement dépend de la température absolue *T* de ce corps et d'une propriété de son état de surface appelée émissivité ε. Ce rayonnement est émis dans un domaine de longueur d'onde qui dépend aussi de la température *T*. A la température de la surface du soleil *(5800 K)*, un corps émet un rayonnement dans un domaine de **longueur d'onde** compris entre 0,25 et 2,5µm. On appelle ce domaine celui des courtes longueurs d'onde CLO ; nous lui affecterons l'indice s (soleil).
La plus grande partie du rayonnement est émise dans le domaine du visible : entre 0,4 et 0,8 µm. Les corps terrestres étant généralement à des températures beaucoup plus faibles, le rayonnement qu'ils émettent se situe dans le domaine de l'infra-rouge (I.R.) ou des grandes longueurs d'onde GLO ; le domaine de l'infra-rouge va de 0,8 µm à une centaine de microns.

Réception du rayonnement

Un rayonnement incident sur une paroi est partiellement (figure 1.3) :

- Réfléchi dans la proportion ρ
- Absorbé dans la proportion α
- Transmis dans la proportion τ

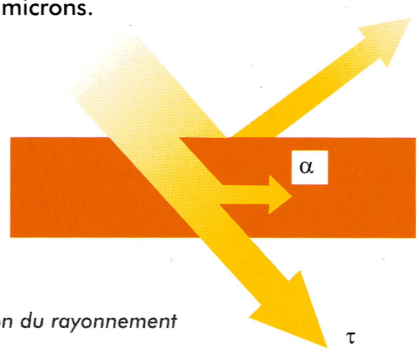


Figure 1.3 - Réception du rayonnement

On a toujours :

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \qquad (1.9)$$

Pour les corps opaques :

$\tau = 0$

et

$$\rho + \alpha = 1 \qquad (1.10)$$

Dans ce cas, ρ et α sont des propriétés de la surface extérieure du corps (et no du matériau qui le compose).

Seul le rayonnement absorbé conduit à l'échauffement du matériau.

Pour la réception du rayonnement solaire, ce sont ρ_s, α_s et τ_s qui interviennent

Emission du rayonnement

Le corps noir est un corps qui, à une température donnée, et pour une longueur d'onde donnée, émet le maximum de rayonnement ; la densité de flux émise par unité de surface du corps noir a pour valeur :

$$\varphi = \sigma T^4 \qquad (1.11)$$

σ = 5,67* 10^{-8} W/m²K^{4} est la constante de Stefan-Boltzman.

Pour le corps noir α = 1 ($\rho = \tau$ = 0).

Un corps quelconque émet une densité de flux φ :

$$\varphi = \varepsilon_{I.R.}\, \sigma T^4 \qquad (1.12)$$

$\varepsilon_{I.R.}$ étant l'émissivité du corps dans l'infra-rouge.

Loi de Kirchoff

Les constantes ρ , α , τ et ε peuvent prendre des valeurs différentes suivant la longueurd'onde ; la loi de Kirchoff énonce que l'on a toujours :

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \qquad (1.13)$$

Corps gris et corps sélectif

On appelle corps gris un corps dont les propriétés sont les mêmes pour toutes les longueurs d'onde. On appelle corps sélectif un corps dont les propriétés sont très différenciées suivant le domaine de longueur d'onde ; exemple : le verre *(voir effet de serre plus bas)*.

Dans le domaine du bâtiment, on considère généralement que les corps se comportent comme des *corps gris dans chaque domaine*. Ainsi, ρ, α, τ et ε sont considérés constants sur tout le domaine de longueurs d'onde du rayonnement solaire ; nous les désignerons par ρ_s, α_s, τ_s et ε_s. On les considère également constants sur tout le domaine de l'infra-rouge ; nous les désignerons par $\rho_{I.R}$, $\alpha_{I.R}$, $\tau_{I.R}$ et $\varepsilon_{I.R}$.
On a toujours :

$$\alpha_S = \varepsilon_S$$

$$\alpha_{I.R} = \varepsilon_{I.R}$$

(la plupart des revêtements ont une valeur de 0,9 pour ces deux derniers coefficients)
Mais généralement :

$$\alpha_s \neq \varepsilon_{I.R}$$

Effet de serre

Certains matériaux tels que le verre et le plastique, ou encore certains gaz *(gaz à effet de serre tels que le CO_2)* sont très sélectifs pour la transmission du rayonnement. Dans une serre solaire par exemple, le verre ayant une valeur élevée pour τ_s *(0,8 à 0,9)* laisse passer la majeure partie du rayonnement solaire.
Ce rayonnement est absorbé par le sol et les plantes présentes dans la serre. Ceux-ci s'échauffent et émettent un rayonnement dans l'infra-rouge.
A l'air libre, ce rayonnement se serait dispersé dans l'atmosphère. Mais le verre étant sélectif, il a une très faible valeur de $\tau_{I.R}$ *(de l'ordre de 0,1)*, et il empêche ce rayonnement infra-rouge de sortir de la serre, aboutissant ainsi à une élévation de la température par rapport à l'ambiance extérieure.

Propriétés utiles de quelques surfaces

Le tableau 1.1 donne les valeurs de α_s et $\varepsilon_{I.R}$ pour quelques types de revêtements et de couleurs.
On se souviendra aussi que :

$$\alpha_{I.R} = \varepsilon_{I.R}$$

Tableau 1.1 *: Propriétés de surface de quelques revêtements*

Matériau ou couleur de revêtement	α_s	$\varepsilon_{I.R.}$
Feuille d'aluminium brillant	0,05	0,05
Feuille d'aluminium oxydé	0,15	0,12
Acier galvanisé brillant	0,25	0,25
Peinture aluminium	0,50	0,50
Enduit de chaux neuf	0,12	0,90
Peinture à l'huile blanche	0,20	0,90
Couleur gris clair	0,40	0,90
Couleur gris foncé	0,70	0,90
Couleur vert clair	0,40	0,90
Couleur vert foncé	0,70	0,90
Couleur noir ordinaire	0,85	0,90

On constate que :

- Par rapport au rayonnement solaire :
  La teinte du matériau caractérise bien sa capacité d'absorption du rayonnement solaire ; plus la teinte est claire, plus la chaleur absorbée est faible.
- Par rapport au rayonnement infra-rouge :
  L'émissivité de la plupart des matériaux est de l'ordre de 0,9 sauf pour l'aluminium et l'acier galvanisé.

Echange de rayonnement entre deux corps gris

L'expression rigoureuse du flux net Q_{12} échangé entre les corps 1 et 2 est donnée par :

$$Q_{12} = S_1 \mathcal{F}_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \qquad (1.14)$$

où F_{12} est le facteur de forme gris entre les deux surfaces; il dépend de leurs positions respectives et de leurs émissivités.
En général dans le bâtiment, les différences de températures entre les parois sont faibles par rapport aux valeurs des températures absolues, ce qui permet de linéariser la loi d'échange, et d'utiliser l'expression simplifiée suivante, qui donne le flux radiatif échangé Q_{rj} entre la surface j et l'ensemble des autres surfaces :

$$Q_{rj} = h_r S_j (T_j - T_{mr}) \qquad (1.15)$$

où T_{mr} est la température moyenne radiante de l'ensemble des autres surfaces *(c'est une moyenne pondérée des températures de ces surfaces)*, donnée par :

$$T_{mr} = \sum_j F_{ij} T_{sj}$$

T_{si} étant la température de surface de la paroi j.

1.2 Déperditions de l'enveloppe en régime permanent

L'approximation quasi-stationnaire consiste à admettre qu'en moyenne, les flux de chaleur transférés à l'extérieur du bâtiment sont égaux aux flux de chaleur qui seraient transférés si les températures intérieures et extérieures étaient constantes *(ce qui induirait un régime permanent)* et égales aux températures moyennes pendant la période considérée.

Déperditions surfaciques

Echanges superficiels

Un élément de paroi est entouré d'air sur ses deux faces. Il existe une zone dans le milieu air, dans laquelle la température et la vitesse de l'air varient rapidement en fonction de la distance à la paroi ; on l'appelle couche limite. Les couches limites situées de part et d'autre de l'élément l'isolent dans une certaine mesure de son environnement.
A l'intérieur de ces zones, la surface extérieure de la paroi échange de la chaleur par convection avec l'air ambiant, et par rayonnement avec les autres surfaces qu'elle " voit ".
Pour tenir compte de ces échanges du côté intérieur de la paroi, on introduit un coefficient d'échanges superficiels interne h_i *(lié aux coefficients h_c et h_r que nous venons de voir)*, de manière à pouvoir écrire :

$$Q_i = S\, h_i\, (T_{si} - T_{op}) \qquad (1.16)$$

Qi étant le flux entre la surface intérieure de la paroi à la température T_{si} et le reste de la pièce, T_{op} étant la température opérative de la pièce, qui est une moyenne pondérée de la température de l'air et de T_{mri}, la température moyenne radiante des autres surfaces intérieures de parois :

$$T_{op} = \frac{h_c T_i + h_r T_{mri}}{h_c + h_r} \qquad (1.16)$$

Pour le côté extérieur, on introduit également un coefficient d'échanges superficiels externe h_e qui permet d'écrire :

$$Q_e = S\,h_e\,(T_{se} - T_{oe}) \qquad (1.17)$$

Q_e étant le flux entre la surface extérieure de la paroi à la température T_{se} et le reste de la pièce, T_{oe} étant la température opérative de l'environnement extérieur, qui est une moyenne pondérée de la température de l'air et de T_{mre} la température moyenne radiante des autres surfaces environnantes, côté extérieur.

(Dans la suite du texte, pour alléger l'écriture, les températures T_{si} et T_{se} seront simplement désignées par T_i et T_e).

Ainsi, $1/h_i$ et $1/h_e$ représentent les résistances thermiques de ces couches limites intérieure et extérieure, par unité de surface.
Dans la pratique, on prend :

$1/h_i$ = 0,06 m²°C/W pour toutes les parois
$1/h_i$ = 0,11 m²°C/W pour les parois verticales
$1/h_i$ = 0,09 m²°C/W pour les parois horizontales en cas de flux ascendant
$1/h_i$ = 0,17 m²°C/W pour les parois horizontales en cas de flux descendant

Résistance thermique totale et coefficient *K*

Si l'on veut exprimer le flux qui traverse la paroi en fonction des températures opératives T_i et T_e *(et non des températures de surface)* de part et d'autre de la paroi (après les couches limites), on doit considérer la résistance totale *R* de la paroi *(par unité de surface)*, y compris celles des couches limites.
On peut alors écrire :

$$Q = S\,\frac{T_1 - T_2}{R} \qquad (1.18)$$

La résistance *R* étant constituée de plusieurs résistances en série s'écrit :

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum_{i=1}^{n} R_i = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_{cond} \qquad (1.19)$$

Les résistances R_i des différentes couches peuvent être simplement calculées ($R_i = \frac{e_i}{\lambda_i}$) s'il s'agit de matériaux homogènes, ou encore lues sur des tables *(les valeurs étant mesurées en laboratoire)* dans le cas de matériaux hétérogènes.
L'inverse de la résistance *R* de la paroi est appelé **coefficient *K***:

$$K = \frac{1}{R} \qquad (1.20)$$

Ce coefficient permet d'écrire le flux qui traverse la paroi sous la forme :

$$Q = K S (T_i - T_e) \qquad (1.21)$$

Le coefficient *K* donne ainsi le flux de chaleur **qui traverse** un élément de paroi par unité de surface et pour une différence de température de 1°C entre l'intérieur et l'extérieur. Durant l'hiver, ce flux représente une perte de chaleur vers l'extérieur.
Durant les journées d'été, la température extérieure est plus élevée que celle du bâtiment, et le flux $Q = K.S.(T_e - T)$ représente donc un **gain** de chaleur pour le bâtiment. Mais on pourra toujours parler de déperditions, car ce flux entraîne une perte de l'énergie dépensée pour la climatisation.

Ponts thermiques et pertes linéiques

Nous avons considéré dans le paragraphe précédent, les pertes de chaleur à travers la partie courante des parois. Cependant, on doit également considérer dans le bilan thermique du local, les pertes liées aux discontinuités de la structure. Ces discontinuités induisent des zones de résistance thermique plus faible que celle des parties courantes ; on les appelle des ponts thermiques, puisqu'elles se laissent traverser par la chaleur plus facilement que les autres parties. On distingue deux types de ponts thermiques :

Les ponts thermiques dus aux matériaux

Ils résultent de la présence en certains points du bâtiment de matériaux ayant une plus grande conductivité thermique ; exemple : figure 1.4.

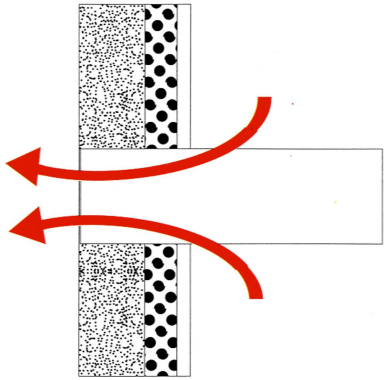


Figure 1.4 - Ponts thermiques dus aux matériaux

Les ponts thermiques dus à la géométrie

En situation de chauffage, ils apparaissent lorsqu'une petite zone de réchauffement *(intérieure)* correspond à une grande zone de refroidissement *(extérieure)*. Cette situation se rencontre dans les angles, les coins et autres discontinuités qui présentent alors une résistance thermique inférieure à celle des autres éléments faits du même matériau ; exemple figure 1.5.

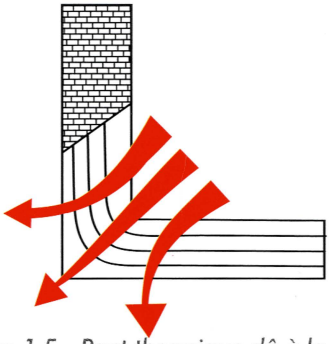


Figure 1.5 - Pont thermique dû à la géométrie

Nous avons vu que lorsque le flux de chaleur est monodimensionnel, la résistance surfacique totale *R* est facile à calculer. Il n'en est pas de même lorsque les lignes de flux de chaleur convergent ou divergent, ce qui est le cas au niveau des ponts thermiques. En remarquant que les discontinuités sont généralement linéiques, on tient compte de ces déperditions en définissant pour les ponts thermiques un coefficient *k* linéique, tel que :

$$Q = k\,l\,(T_i - T_e) \qquad (1.22)$$

l étant la longueur de la jonction [m]. Les valeurs de *k* sont généralement difficiles à calculer, et on les lit sur des tableaux.
Lorsqu'un pont thermique est commun à deux parois, on subdivise son influence en deux parties, chacune étant attribuée à la paroi correspondante.

Déperditions par renouvellement d'air

Le renouvellement de l'air du bâtiment est nécessaire pour des raisons d'hygiène. Il peut être réalisé par ventilation mécanique contrôlée (VMC) ou par ventilation naturelle. Dans les deux cas, il existe aussi un renouvellement d'air incontrôlé, dû aux infiltrations à travers les ouvrants et les orifices du bâtiment, et aux ouvertures de porte pour le passage.

Un renouvellement d'air de N volumes du bâtiment par heure, conduit à remplacer chaque heure N fois le volume V d'air du local à la température intérieure T_i par le même volume d'air à la température T_e ; la quantité de chaleur nécessaire pour amener cet air à la température voulue T_i est :

$$Q_v = C_v N V (T_i - T_e) \qquad (1.23)$$

C_v étant la chaleur volumique de l'air (0,34 Wh/m³°C).

Déperditions vers les locaux non climatisés

Il s'agit des parois en contact avec un local non climatisé (garage, cage d'escalier ...), un comble ou un vide sanitaire. Pour la zone en contact avec ce local non conditionné, les déperditions sont calculées par :

$$Q = \tau \left[\sum (K A) + \sum (k l) \right] (T_i - T_e) \qquad (1.24)$$

τ est appelé coefficient de réduction de température ; il est donné par :

$$\tau = \frac{T_i - T_n}{T_i - T_e}$$

où T_n est la température du local non climatisé. Cette température peut être calculée à travers un bilan thermique de ce local. On trouve alors l'expression suivante pour τ :

$$\tau = \frac{D_e}{D_e + A_c} \qquad (1.25)$$

avec

$$A_c = \sum_c K_c A_c + \sum_c k_c l_c$$

de la (ou des) paroi(s) mitoyenne(s) entre les deux espaces.

$$D_e = \sum_e K_e A_e + \sum_e k_e l_e$$

la somme concernant les parois du local non chauffé qui sont en contact avec l'extérieur.

Le coefficient G

En saison de chauffage, la puissance perdue pour la zone thermique i est donnée par :

$$P_i = \sum_j K_j S_j (T_i - T_e) + \sum_n k_n l_n (T_i - T_e) + C_v N_i V_i (T_i - T_e) \qquad (1.26)$$

Pour un bâtiment composé de *m* zones thermiques, l'ensemble des déperditions est donné par :

$$P = \sum_{i=1}^{m} P_i \qquad (1.27)$$

Si l'on définit un **coefficient G** [4] comme étant :

$$G \equiv \frac{1}{V}\left[\sum_{i=1}^{m}\left\{\sum_{j} K_j S_j + \sum_{n} k_n l_n + C_v N_i V_i\right\}\right] \qquad (1.28)$$

V étant le volume du bâtiment, on peut écrire :

$$P = G.V.(T_i - T_e) \qquad (1.29)$$

Le coefficient G (W/m³°C) donne ainsi la puissance perdue par unité de volume du bâtiment et pour une différence de température de 1°C entre l'intérieur et l'extérieur. Il représente les caractéristiques thermiques de l'enveloppe en régime quasi-stationnaire.

Pendant la durée de la saison de chauffage, l'énergie E_h perdue par l'enveloppe pour l'ensemble des zones sera :

$$E_h = G\,V \int_{\substack{saison\ de \\ chauffage}} (T_i - T_e)^+ dt = GVDH_h^+ \qquad (1.30)$$

(le signe + placé en exposant signifie que seules les quantités positives à l'intérieur des parenthèses sont considérées)

DH_h^+ représente les degrés-heures de chauffage.

De même, pendant la durée de la saison de refroidissement, l'énergie E_e qui traverse l'enveloppe, du fait de la différence de température entre extérieur et intérieur sera :

$$E_e = G\,V \int_{\substack{saison\ de \\ refroidissement}} (T_e - T_i)^+ dt = GVDH_e^+ \qquad (1.31)$$

DH_e^+ représente les degrés-heures de climatisation.

1.3 La ventilation des locaux

Nécessité et impact de la ventilation

La ventilation des locaux répond à cinq exigences principales :

- Satisfaire les besoins d'hygiène et de confort des occupants ; il faut leur apporter de l'oxygène, éliminer les odeurs, les fumées, le dioxyde et le monoxyde de carbone, ainsi que les produits dégagés par l'ameublement ou les structures du bâtiment : formaldéhydes, composés organiques volatils et radon.

> ***« L'impact de la ventilation sur le bilan énergétique est loin d'être négligeable. Sa part atteint facilement 25% à 35% des besoins,... »***

- Améliorer le confort thermique en saison chaude ; un courant d'air contribue à l'amélioration de la sensation de confort par élimination de la sueur.
- Réduire les besoins de climatisation ou améliorer la qualité de l'ambiance intérieure en saison chaude. L'été, la ventilation des locaux quand l'air extérieur devient moins chaud que l'air intérieur (en particulier la nuit), associée à une forte inertie thermique, permet d'évacuer la chaleur stockée dans la structure du bâti. La réduction de la ventilation à son minimum durant les heures chaudes permettra en revanche de conserver cette fraîcheur.
- Assurer la conservation du bâti. Ceci est obtenu par l'élimination de la vapeur d'eau produite par les occupants *(environ 2,5 l/j.pers)*, qui génèrerait condensations et dégradations.
- Permettre le fonctionnement en toute sécurité des appareils à combustion situés à l'intérieur des logements.

La nécessité de ventiler est donc indéniable. Mais l'impact de la ventilation sur le bilan énergétique est loin d'être négligeable. Sa part atteint facilement 25% à 35% des besoins, et même davantage dans le cas des logements bien isolés. Plus le coefficient de forme d'un bâtiment est faible, plus la part de la ventilation dans le bilan énergétique est importante.

Moyens et contrôle de la ventilation

Il faut donc assurer un taux minimum de ventilation, en évitant qu'il ne varie trop fortement en fonction des conditions climatiques extérieures (vent et température). On peut arriver à ce résultat de deux manières :

- **Ventilation naturelle par les fenêtres**
  On compte sur la discipline de l'occupant pour contrôler la ventilation : ouverture régulière des fenêtres, mais sans excès (un quart d'heure est suffisant pour renouveler l'air). C'est la solution la plus simple ; elle convient généralement dans les logements.

- **Ventilation mécanique contrôlée**
  C'est la solution la plus fiable, mais la plus coûteuse, tant en investissement qu'en énergie de fonctionnement. De plus, une installation de VMC ne permettra de contrôler réellement les flux d'air que si elle a été correctement calculée, dimensionnée et soigneusement équilibrée. En l'absence de cet équilibrage, on aura une inefficacité du système de ventilation, une insatisfaction des occupants, et un gaspillage d'énergie.

Ce qu'il faut clairement percevoir, c'est qu'un taux minimum de ventilation est indispensable, mais qu'il ne doit **pas** être assuré par des infiltrations au travers de fenêtres inétanches. Il est essentiel de pouvoir **contrôler** les flux d'air.

Stratégie de ventilation l'hiver

Elle consiste à :

- Réduire au minimum l'air entrant en tenant compte de l'occupation des locaux et de l'activité pour calculer les taux minima requis
- Préchauffer l'air entrant quand cela est possible *(prise d'air dans une serre, récupération sur l'air extrait ...)*

Stratégie de ventilation l'été

Elle consiste à :

- Refroidir la masse du bâtiment, en admettant un renouvellement d'air important durant les heures fraîches, et réduit au minimum durant les heures chaudes. Le premier objectif suppose une organisation des locaux qui favorise la ventilation naturelle.
- Refroidir l'air avant son admission : par humidification (point d'eau, végétation...), ou en le faisant circuler dans une canalisation enterrée (puits canadien).
- Brasser l'air pour améliorer la sensation de confort durant les heures chaudes *(ventilateur)*. Pour une bonne sensation de confort, la vitesse de l'air ne doit pas dépasser 1 m/s.

Les facteurs d'une bonne ventilation naturelle

- L'organisation des locaux :
  Une double orientation des locaux aura un impact positif sur la ventilation.
  A l'inverse, le cloisonnement, la mono-orientation ou même une double orientation contiguë la freine (voir figure 1.6).
- La végétation extérieure peut être utilisée avantageusement pour freiner les vents dominants en hiver, créer des zones d'ombre en été générant des courants d'air, et pour humidifier l'air extérieur.

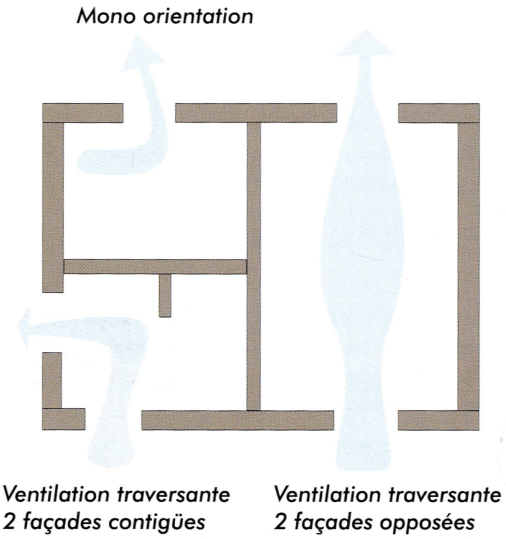


Figure 1.6 - Ventilateur suivant l'organisation des espaces

Chapitre 2

Caractéristiques d'un bâtiment en régime variable

2.1 Le régime variable

Les échanges de chaleur ne se font quasiment jamais en régime permanent dans un bâtiment. La température de l'air ou celle des parois change ; certains éléments emmagasinent de la chaleur, ou au contraire en perdent. Lorsque les variations des conditions extérieures et intérieures sont très lentes, par rapport à la durée d'établissement d'un flux constant, on peut considérer qu'on est en régime permanent, ou établi, ou encore quasi-stationnaire. Dans d'autres situations, par contre, on est très éloigné d'une situation de quasi-stationnarité, notamment :

- Lors d'un changement brutal des conditions qui avaient créé un régime quasi-stationnaire :
  - Intermittence du chauffage, de la climatisation ; mise en régime
  - Modification brutale des apports gratuits : affluence de l'occupation, apports solaires brusquement occultés ou autorisés...
  - Ouverture / fermeture de portes et fenêtres , ...
- Lorsque le bâtiment doit répondre par lui-même aux variations quotidiennes des paramètres météorologiques, en l'absence de tout moyen artificiel de climatisation ou de chauffage.

Notion d'inertie

En régime variable, l'inertie du bâtiment joue un rôle important et doit être prise en compte pour la caractérisation du bâtiment.

La quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un corps ne dépend pas seulement de sa masse, mais aussi de la capacité de stockage de chaleur par unité de masse du matériau qui le compose. Cette caractéristique est désignée par la chaleur spécifique Cp du matériau. On appelle capacité thermique C d'un corps le produit de sa masse m et de sa chaleur spécifique Cp.

Lorsqu'un corps en équilibre thermique est soumis à un changement des conditions environnantes, il ne gagne un nouvel équilibre qu'au bout d'un certain temps, en théorie infini, en pratique fini et fonction de la nature des matériaux qui le composent. L'inertie thermique caractérise la lenteur de cette mise en équilibre. L'inertie d'un bâtiment dépend notamment de la capacité thermique C des matériaux qui le composent, et de leur résistance R, mais pas uniquement.
La conduction en régime variable dans les parois ne peut être traitée de manière analytique, pour des situations réelles (variations réelles des sollicitations, notamment météorologiques). C'est pour cela qu'on a recours à la simulation avec des logiciels détaillés. Citons parmi ces logiciels : TRNSYS, DOE-2, Energy Plus, COMFIE , ...

2.2 Caractéristiques dynamiques des parois en régime périodique

Un bâtiment soumis à des variations sinusoïdales de température et / ou de flux durant un temps assez long, finit par atteindre un régime harmonique établi. Dans ce cas, la température et le flux en tout point seront des fonctions harmoniques du temps (sinusoïdales).

Capacité thermique de stockage et constante de temps

En régime périodique, la capacité thermique de stockage intérieure de la paroi C_{int} est définie comme étant l'intégrale sur une demi-période du flux qui traverse la surface intérieure de la paroi, divisée par la variation de température de l'air intérieur, pendant la même durée. On peut montrer que :

$$C_{int} = \frac{P}{2\pi}\left|\frac{1-M_{11}}{M_{12}}\right| \qquad (2.1)$$

P étant la période des variations sinusoïdales, M_{11} et M_{12} étant des éléments de la matrice de transfert de la paroi en cas de régime périodique.

Cette capacité intérieure reflète la capacité de la paroi à stocker des variations de flux de chaleur sur sa face intérieure. Ces variations peuvent être dues à un flux solaire ou à l'utilisation intermittente d'un équipement de chauffage léger. Ainsi, la fraction des apports solaires qui seront utiles (voir § 3.1 plus loin) dépendra notamment de cette caractéristique de la paroi.

La constante de temps τ de la paroi indique la rapidité avec laquelle la paroi réagit aux variations des conditions ambiantes. Lorsqu'il s'agit des variations des conditions ambiantes intérieures, τ est définie comme étant :

$$\tau = C_{\text{int}} R = \frac{C_{\text{int}}}{K} \qquad (2.2)$$

R étant la résistance thermique surfacique de la paroi, et K son coefficient de transmission thermique.

Pour un bâtiment entier, on remplacera K par le produit GV du bâtiment, et C_{int} de la paroi par la capacité intérieure du bâtiment, calculée comme étant la somme des valeurs C_{int} des différentes parois, pondérées par leurs surfaces.

$$C_{\text{int},tot} = \sum_i C_{\text{int},i} A_i \qquad (2.3)$$

La constante de temps du bâtiment tout entier est alors calculée comme étant :

$$\tau_{bat} = \frac{C_{\text{int},tot}}{GV} \qquad (2.4)$$

Valeurs de ces caractéristiques pour quelques parois

Le tableau 2.1 fournit les valeurs de K et C_{int} (en saison froide) pour quelques parois couramment utilisées en Tunisie [5]. Ces valeurs ont une influence sur les apports solaires utiles et effectifs.

Tableau 2.1 - Coefficient K et Capacité intérieure pour quelques parois

Intitulé	Description	Composition précise (de l'int. vers l'ext.)	e (cm)	K $(W/m^2°C)$	C_{int} $(kJ/m^2°C)$
Mur 1	Brique 12 trous	Mortier bâtard Brique 12 trous Mortier ciment	2 15 2.5	1.90	66
Mur 2	Double cloison de briques	Mortier bâtard Briques plâtrières Lame d'air Briques 2 trous Mortier ciment	2 6.5 4 15 2.5	1.21	67
Mur 3	Double cloison avec isolant	Mortier bâtard Briques plâtrières Polystyrène expansé Briques 12 trous Mortier ciment	2 6.5 4 15 2.5	0.59	65
Mur 4	Mur en pierre	Mortier ciment Pierres de taille demi dures Mortier ciment	2.5 40 2.5	2.04	87
Mur 5	Double cloison: pierre, brique et isolant	Mortier ciment Pierre de taille Polystyrène expansé Briques plâtrières Mortier ciment	2.5 30 4 6.5 2.5	0.63	84
Toiture 1	Non isolé	Mortier bâtard Corps creux de terre cuite ton Bétons à granulats fins Mortier ciment Etanchéité	2 16 5 10 2.5 0.5	2.21	81
Toiture 2	Toiture isolée	Mortier bâtard Corps creux de terre cuite Béton Polystyrène Bétons à granulats fins Mortier ciment	2 16 5 5 10 2.5	0.58	78
Plancher 1	Plancher sur terre plein	Etanchéité Mortier ciment Lit de sable Béton Hérisson	0.5 2 3 5 15		79
Plancher 2	Plancher intermédiaire	Carreaux mosaïques Mortier ciment Lit de sable Béton Corps creux de terre cuite Mortier bâtard	2 2 3 5 16 2		80

2.3 Le pouvoir isolant des matériaux de construction

Nous avons vu (équation (1.2) du 1er chapitre) qu'en régime quasi-stationnaire, la densité de flux qui traverse un matériau donné s'écrit :

$$\varphi = \frac{\lambda}{e}(T_1 - T_2) \qquad (2.5)$$

Le coefficient de conductivité λ décrit l'aptitude du matériau à conduire la chaleur ; il est élevé pour les matériaux conducteurs et faible pour les matériaux isolants ; si l'on considère les valeurs de λ en W/m°C, on trouve :

- Métaux : $5 < \lambda$
- Matériaux conducteurs : pierre, béton $0,6 < \lambda < 5$
- Matériaux assez isolants : briques $0,2 < \lambda < 0,6$
- Matériaux très isolants : bois, polystyrène $\lambda < 0,2$

L'un des meilleurs matériaux isolants est l'air immobile (λ = 0,024 W / m°C) ; aussi la plupart des matériaux isolants ont pour fonction d'immobiliser l'air dans des alvéoles ou des structures fibreuses.
Lorsqu'une lame d'air est comprise dans une paroi entre deux couches de matériaux, elle est également traversée par des flux convectifs et radiatifs, en plus du flux conductif. On considère généralement que la résistance thermique d'une lame d'air d'épaisseur inférieure ou égale à 5 cm, est de 0,16 m²°C/W, compte tenu des trois modes d'échanges.

Le rôle de l'isolation

Une paroi bien isolée permet de :

- Réduire les déperditions de chaleur en saison froide et la pénétration de chaleur en saison chaude, et par conséquent économiser l'énergie de conditionnement,
- Compenser la réduction de l'épaisseur totale des parois dans les modes constructifs modernes,
- Eviter la condensation dans les parois et sur les parois, grâce au maintien de températures pas trop basses,
- Eviter la sensation de froid (hiver) ou la sensation de chaud que l'on éprouve au voisinage d'une paroi trop froide ou trop chaude, à cause des échanges radiatifs.

La résistance R d'une paroi ou son coefficient K (inverse de la résistance R) exprime bien le pouvoir isolant de la paroi. Pour un bâtiment entier, c'est le coefficient G qui exprime son pouvoir isolant *(une petite valeur de G est liée à un bâtiment bien isolé)*. Ces caractéristiques sont suffisantes pour décrire le comportement des parois et du bâtiment en **régime permanent.**

2.4 Les matériaux et l'inertie

L'inertie thermique caractérise la réponse d'un matériau, d'un élément de construction, ou d'un bâtiment, à des ***variations*** des conditions environnantes auxquelles il est soumis.

Caractéristiques d'un matériau liées à l'inertie

Lorsque la température varie au cours du temps au sein d'un matériau, deux propriétés thermiques de ce matériau entrent en jeu. Ce sont :

- La conductivité thermique λ [W / m°C]
- La capacité thermique volumique ρC_p [Wh / m³ °C]

La première intervient dans le transfert de la chaleur à travers la paroi, alors que la seconde assure le stockage (ou la restitution) de la chaleur.

Dans l'étude analytique des variations de température et de flux, on rencontre deux nouvelles grandeurs, construites à partir des deux précédentes ; ce sont :

- **La diffusivité thermique *a*** définie comme étant :

$$a \equiv \frac{\lambda}{\rho C_p} \qquad [\mathrm{m^2 / h}] \qquad (2.6)$$

La diffusivité caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Plus elle est faible, plus le front de chaleur mettra de temps à traverser l'épaisseur du matériau , c'est-à-dire que le déphasage entre les deux faces du mur sera important ·

- **L'effusivité thermique *b*** définie par :

$$b \equiv \sqrt{\lambda \rho C_p} \qquad [\mathrm{W\,h^{0,5}/m^2 °C}] \qquad (2.7)$$

L'effusivité caractérise la capacité des matériaux à réagir plus ou moins rapidement à un apport de chaleur *intérieur* au logement, que cet apport soit dû à une source interne ou au rayonnement solaire.
Plus l'effusivité est grande, plus la chaleur interne à la pièce sera rapidement absorbée par le matériau, et plus l'élévation de température dans le local sera limitée. La densité de flux de chaleur qu'un matériau est capable de stocker, dépend ainsi de cette grandeur *(et de la surface du matériau exposée au flux)*.

Inertie d'un élément de construction (paroi)

L'observation de la propagation de la chaleur dans un matériau *(surtout s'il s'agit d'une variation de sollicitation rapide à durée limitée)*, permet de mettre en évidence deux phénomènes fondamentaux : le déphasage et l'amortissement du signal de température. En raison de la vitesse limitée de la propagation de la chaleur (sauf pour les métaux), l'échauffement de la matière située à une certaine distance de la face chauffée se fait avec un certain retard appelé ***déphasage***.

Déphasage et amortissement du signal de température : 2 phénomènes fondamentaux

De plus, l'amplitude de cet échauffement est d'autant plus faible que l'on s'éloigne de la face chauffée : c'est ***l'amortissement*** du signal de température. Le déphasage et l'amortissement dépendent de la diffusivité *a* et de l'épaisseur du matériau; un déphasage important est accompagné d'un amortissement important.

Dans le cas de parois multicouches, le déphasage et l'amortissement dépendent de la diffusivité et de l'épaisseur des différents matériaux, mais aussi de l'***ordre*** dans lequel ils sont placés par rapport au signal.
Par exemple, le déphasage et l'amortissement sont différents selon que le signal de température traverse la paroi dans un sens ou dans l'autre.

La figure 2.1 montre la réponse de deux parois [7], l'une peu inerte (béton banché), l'autre très inerte *(mur 5 du tableau 2.1)*, aux variations de la température extérieure pour une journée d'été sans conditionnement.
On voit que plus l'inertie de l'enveloppe est importante, plus la température maximale d'été est faible, le déphasage et l'amortissement étant plus importants.

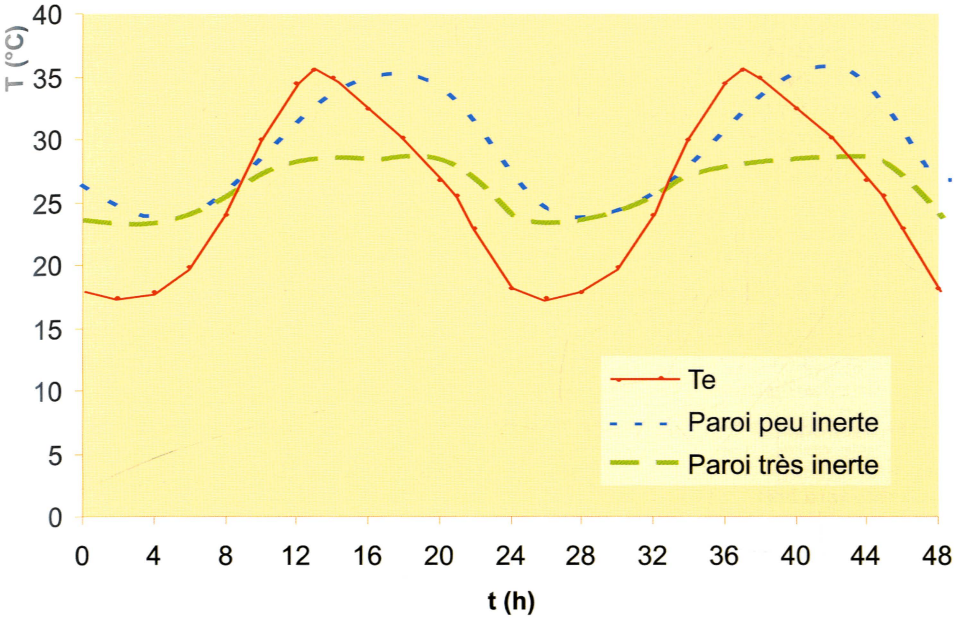


Figure 2.1 - Influence de l'inertie de l'enveloppe sur le déphasage et l'amortissement

Rôle de l'inertie pour le bâtiment

Le stockage thermique permet d'améliorer le confort et de réduire les consommations tant l'hiver que l'été

L'inertie thermique caractérise la capacité d'un bâtiment à stocker de la chaleur. Elle permet notamment de stocker durant une journée de chauffage la chaleur fournie par les apports solaires. Cette inertie peut être une inertie de transmission (*à travers les parois dont la face extérieure est soumise à l'exposition solaire*) ou une inertie d'absorption (*capacité à stocker la chaleur dans les parois du côté interne*).
En hiver, la chaleur emmagasinée durant les heures ensoleillées sera restituée durant la soirée. En été, la chaleur emmagasinée durant la journée, pourra être évacuée la nuit, grâce à la fraîcheur de l'air nocturne. Ce mécanisme est très efficace en cas de ventilation nocturne renforcée et d'inertie assez forte. Il peut permettre l'établissement d'un confort acceptable jour et nuit l'été, et éviter le recours à la climatisation dans les bâtiments résidentiels. Cet effet de stockage thermique permet ainsi d'améliorer le confort et de réduire les consommations tant l'hiver que l'été. Dans tous les cas, l'inertie thermique a un rôle d'amortissement des fluctuations de température et contribue ainsi à la stabilité des températures d'air et de parois ; elle permet d'éviter les surchauffes dues aux apports solaires en hiver et en demi- saisons.

En climat aride en particulier, les constructions sont soumises à de très fortes variations journalières de température. Des constructions enterrées *(exemple : Matmata)* ou comportant des murs épais et massifs *(exemple : les " ksours " dans le sud du pays)* amortissent avec succès ces variations de température.

Dans les bâtiments climatisés et dans ceux où il n'est pas possible de réaliser une bonne ventilation nocturne, l'inertie aura quand même pour effet une réduction de la puissance des équipements à installer et une réduction des consommations énergétiques.
L'inertie devra être forte, particulièrement dans les cas suivants :

- Forte intermittence des apports de chaleur l'hiver ; par exemple quand la surface vitrée est importante, ou quand le chauffage est utilisé de manière intermittente *(radiateurs utilisés en soirée seulement)*
- Protections solaires peu efficaces l'été ou possibilités de ventilation réduites

Dans des bureaux qui ne sont occupés que quelques heures par jour, une inertie plus faible sera préférée.

Les facteurs influents

L'effet le plus utile et recherché sera celui de l'inertie journalière. Une inertie séquentielle, c'est-à-dire permettant d'amortir les effets de période courte *(de l'ordre d'une décade)* sera également recherchée. Par contre, une inertie thermique permettant un stockage saisonnier *(comme dans les ksours)*, n'est ni utile ni recommandée dans la construction contemporaine.

Les facteurs qui influent sur l'inertie sont :

- Les qualités intrinsèques des matériaux *(chaleur volumique et conductivité)* ; les matériaux les plus adaptés au stockage de chaleur sont les matériaux denses à forte chaleur spécifique : le béton, la pierre, la brique pleine.
- Les dimensions des éléments de construction
  - **L'épaisseur** ; l'inertie augmente avec l'épaisseur des matériaux
    Cependant, si l'on se rappelle que l'effet de l'inertie est recherché pour des périodes courtes *(10 jours maximum)*, on comprend que l'on n'a pas besoin d'un stockage de la chaleur en profondeur : les 10 premiers centimètres sont efficaces pour une inertie quotidienne, l'inertie séquentielle étant obtenue par les 10 centimètres suivants.
  - **La surface d'échange** ; plus que l'épaisseur, c'est cette surface d'échange qui détermine l'inertie utile. Ainsi, un mur porteur intérieur comprenant deux faces d'échange thermique, présentera plus d'inertie qu'un mur extérieur qui n'a qu'une seule face.

L'inertie peut donc être réalisée principalement par :

- Les murs porteurs intérieurs
- Les murs extérieurs
- Le plafond et le plancher
- Les cloisons intérieures si elles ont une certaine masse *(briques, carreaux de plâtre ...)*

Lorsque les parois contiennent un isolant spécifique, seules les parties de maçonnerie comprises entre l'intérieur du local et l'isolant interviendront dans l'inertie interne. L'avantage d'une grande inertie interne est qu'elle permet de stocker les apports de chaleur interne et donc de les répartir dans le temps. L'inconvénient est qu'au démarrage du chauffage, le local à isolation externe mettra beaucoup plus de temps que le local à isolation interne pour atteindre sa température finale.
C'est pourquoi l'isolation interne peut être appropriée pour des bureaux, mais pour des logements, on préférera l'isolation externe.

2.5 Isolation et inertie

Il convient de bien distinguer les notions d'inertie et d'isolation.

Sur le plan **des effets**, une paroi bien isolée résiste davantage au passage du flux de chaleur qu'une autre. L'isolation atténue le flux de chaleur *moyen* entre le local et l'extérieur. C'est pourquoi elle est suffisante pour caractériser l'enveloppe en cas de régime permanent. L'inertie quant à elle s'oppose aux *changements*, aux variations de flux. Elle atténue les fluctuations de température et de flux. Pour caractériser complètement le comportement du bâtiment en régime variable, il est donc indispensable de tenir compte de l'isolation et de l'inertie.

Sur le plan de **la nature des matériaux**, les matériaux les plus isolants contiennent généralement des alvéoles d'air ; ils ne sont donc pas denses et ne peuvent stocker une grande quantité de chaleur par unité de volume. A l'opposé, les matériaux les plus inertes, qui se prêtent bien au stockage de la chaleur, sont des matériaux denses : béton, pierre, briques pleines ...

Sur le plan des **dimensions des parois** : une plus grande épaisseur entraîne une plus grande isolation et une plus grande inertie. Cependant, le gain marginal va en s'affaiblissant pour ce qui est de l'isolation. Quant à l'inertie, nous avons déjà vu que seules les deux premières dizaines de centimètres sont réellement utiles. Pour ce qui est de la surface, une grande surface extérieure diminue la résistance totale du bâtiment et n'est donc pas souhaitable en climat froid. Une grande surface pour les murs et les cloisons intérieures est très bénéfique sur le plan de l'inertie.

Chapitre 3

Apports gratuits et besoins énergétiques

Avant les deux crises du pétrole dans les années 70, on considérait que les besoins du bâtiment en énergie de chauffage étaient égaux à ses déperditions. La prise de conscience de la rareté des énergies fossiles a conduit à la prise en compte des apports gratuits, qui sont alors déduits des déperditions (en saison froide) pour donner les besoins de chauffage.

3.1 Apports bruts, apports utiles et apports effectifs

Les apports gratuits sont des apports de chaleur qui ne représentent pas un coût d'exploitation. Ils comprennent les apports gratuits internes, qui sont générés dans le bâtiment, et les apports solaires. L'ensemble de ces apports gratuits *(solaires et internes)* contribue à satisfaire une part de la charge de chauffage l'hiver ; ils sont donc bénéfiques en cette saison, et on cherchera à les favoriser. L'été par contre, une part de ces apports se traduit par un surcroît de chaleur qu'il incombe au système de climatisation de neutraliser ; ces apports se traduisent donc par une augmentation des charges de climatisation et on s'efforcera de les réduire autant que faire se peut. On distinguera :

- **Les apports gratuits bruts A_b** :
  C'est la totalité du flux d'énergie gratuite *(essentiellement solaire)*, qui pénètre effectivement dans le bâtiment.
- **Les apports gratuits utiles A_u** en saison froide :
  En cette saison, les apports gratuits bruts A_b se subdivisent en une part utile A_u, qui contribue à satisfaire le besoin de chauffage, et une part inutile, car elle conduit à des surchauffes.
- **Les apports gratuits effectifs $A_{u,u}$** en saison chaude :
  En cette saison, une partie des apports gratuits bruts cause une élévation de température, jusqu'à atteindre la température de consigne ; cette partie n'induit pas une charge de climatisation. L'autre partie $A_{u,u}$, produirait effectivement des surchauffes *(si la climatisation n'intervenait pas)*, et doit être comptabilisée dans le besoin de climatisation.

3.2 Les apports internes

Les apports internes sont liés à l'occupation des locaux, qui s'accompagne de dégagement - involontaire- de chaleur dû à :

- L'éclairage.
- La chaleur dégagée par les occupants. Une personne sédentaire dégage une puissance de 100 à 120 W. Une partie de cette énergie est dégagée sous forme de vapeur et n'est pas récupérable. La puissance utilisable est donc de 80 W par personne au repos, et l'énergie liée à la présence permanente d'une personne est de l'ordre de 1 à 1,2 kWh/jour.
- La chaleur dégagée par les équipements *(bureautique, équipements électroménagers)*. Il faut remarquer que la réduction des consommations électroménagères aura pour conséquence indirecte de diminuer ces apports, ce qui permettra de réduire les besoins de refroidissement, mais accroîtra ceux de chauffage. Le bilan économique est bien entendu très positif.
- Les apports dégagés par la cuisine. Des écarts importants existent d'un logement à l'autre et d'un mois à l'autre, mais ces apports sont généralement assez consistants.
- Les apports dégagés par l'installation de production, de stockage et de distribution d'eau chaude sanitaire. Ils sont peu élevés, sauf dans le cas où l'installation comporte un ballon de stockage situé dans le volume habitable.

Pour des calculs dans des conditions normalisées, on prendra les apports internes égaux à 100 Wh par jour et par m^2 habitable.

3.3 Les apports solaires

Les apports solaires sont soit transmis à travers les vitrages du bâtiment, soit transmis par conduction à travers les parois opaques. Pour les parois verticales, l'essentiel des apports solaires est transmis par les vitrages. Cependant, les apports par les parois opaques ne sont pas négligeables sous notre latitude. Le rayonnement solaire incident sur la toiture joue un rôle très important durant l'été, en particulier si la toiture n'est pas isolée. Les apports solaires transmis par les vitrages étant contrôlables suivant l'heure et la saison *(contrairement à ceux qui pénètrent à travers les parois opaques)*, une bonne conception des fenêtres est primordiale, pour assurer un bon compromis entre exigences d'été et exigences d'hiver.
Encore plus que pour les apports internes, il est essentiel de faire la différence entre apports solaires bruts, apports solaires utiles et apports solaires effectifs.

Variation des irradiations solaires

Il convient d'abord de distinguer le rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire diffus.

- **L'éclairement solaire direct** est le flux par unité de surface, provenant directement du disque solaire.
Pour un plan donné, on considérera uniquement la composante de l'éclairement direct qui est normale à ce plan.

- **L'éclairement solaire diffus** est le flux reçu par unité de surface, provenant de la voûte céleste, après diffusion par les molécules et les particules présentes dans l'atmosphère. Pour un plan donné, l'éclairement diffus qu'il reçoit dépend de la partie de la voûte céleste qui est " vue " par ce plan.

- **L'éclairement global** incident sur un plan est la somme des éclairements direct et diffus .

Les irradiations solaires directes et diffuses sont l'intégration sur une période donnée des flux solaires direct et diffus. L'irradiation globale est l'intégrale du flux global sur cette période.
La figure 3.1 montre l'évolution des irradiations mensuelles globales et diffuses durant les 12 mois de l'année à Tunis [6]. On voit que l'irradiation diffuse constitue une part plus importante de l'irradiation globale durant les mois d'hiver où la présence de masses nuageuses est plus importante.

Les stations météorologiques mesurent généralement l'éclairement global et l'éclairement diffus sur le plan horizontal.

Un obstacle se trouvant entre le disque solaire et le plan récepteur occultera totalement le flux direct, mais une petite partie seulement de l'éclairement diffus, celle qui provient de la partie de la voûte céleste qui est cachée par l'obstacle.

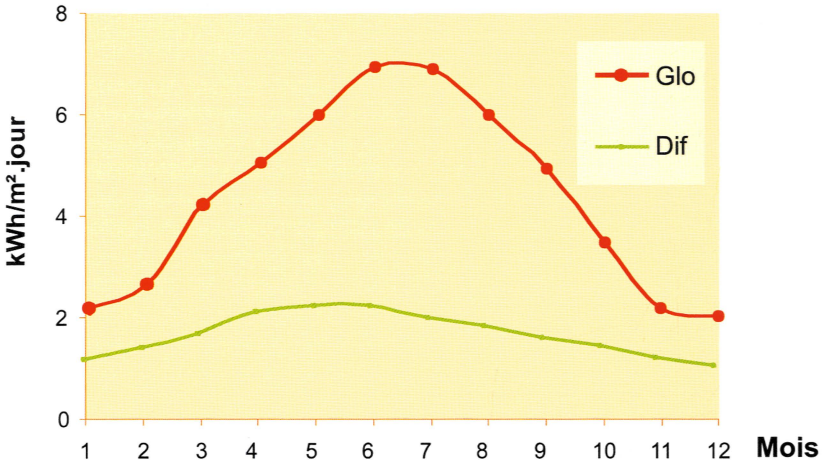


Figure 3.1 - Variation annuelle des irradiations solaires à Tunis

Pour un plan autre qu'horizontal, la composante du rayonnement direct qui est normale à ce plan dépend de l'angle d'incidence des rayons solaires sur ce plan, et donc de l'orientation et de l'inclinaison de ce plan. L'éclairement diffus reçu par ce plan ne dépend que de son inclinaison sur l'horizontale. La figure 3.2 illustre la variation mensuelle de l'irradiation globale sur le plan horizontal, ainsi que sur des plans verticaux orientés vers le sud, vers l'est et vers le nord.

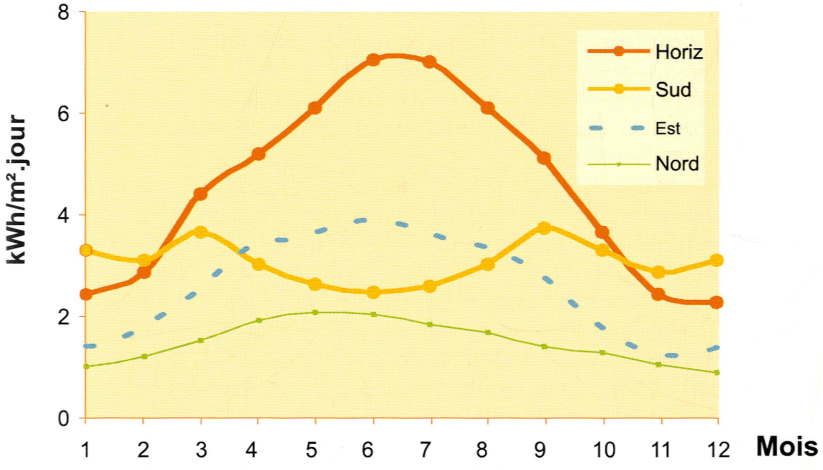


Figure 3.2 - Variation annuelle de l'irradiation globale sur différents plans

On constate sans surprise que **la façade sud est la plus ensoleillée durant l'hiver**. Mais on voit aussi (*ce qui est moins connu*), que **durant l'été, une façade est** (*ou ouest*) **reçoit davantage d'irradiation que la façade sud.** Cela est dû à la trajectoire du soleil et à sa hauteur dans le ciel.
En effet, durant l'hiver, le soleil ne se trouve jamais en face d'une façade est ou ouest. En milieu de journée, alors qu'il est au sud, sa hauteur dans le ciel est relativement faible ; la composante du rayonnement qui est normale au plan vertical sud est donc importante.
Durant l'été, le soleil se lève entre l'est et le nord-est. Quand il se trouve en face de la façade est, il n'est pas très haut dans le ciel et l'angle d'incidence par rapport à cette façade est donc faible. Il en résulte une composante directe assez importante. Par contre, en milieu de journée quand le soleil est au sud, sa hauteur dans le ciel fait que l'angle d'incidence par rapport à un plan vertical sud est important ; la composante du direct qui est normale à ce plan n'est donc pas très élevée.

Conception des fenêtres

Rappelons que le verre étant transparent au rayonnement visible, il laisse passer les rayons solaires qui atteignent alors les murs, les planchers et les cloisons intérieures. Ceux-ci s'échauffent plus ou moins en fonction de leur couleur, provoquant ainsi la réémission d'un rayonnement de grande longueur d'onde (infrarouge) que le verre ne laisse plus passer. Les rayons solaires ont ainsi été capturés dans le bâtiment : **c'est l'effet de serre**.

Ainsi, le verre est caractérisé par un comportement différent (*sélectif*), suivant le domaine de longueur d'onde :

- Pour la transmission de la lumière : il est très transparent, ce qui permet aux fenêtres d'assurer une double fonction **d'éclairage naturel** et de **visibilité** de l'environnement extérieur
- Pour la transmission de la chaleur : il est presque opaque, ce qui permet aux fenêtres d'assurer (*si on les compare à une ouverture non vitrée*), une fonction de **protection thermique** de l'ambiance intérieure par rapport à l'extérieur.

Cependant, les vitres étant très minces, leur coefficient K est bien plus élevé que celui des parois. Cela signifie que le remplacement d'une partie de la paroi par une fenêtre représente un accroissement des déperditions. Il convient alors, en saison froide, de voir si le gain solaire (*utile*) rapporté par la fenêtre est supérieur ou inférieur au surcroît de déperditions qu'elle représente. Cela dépend de la nature du vitrage, de son orientation, de la présence ou non de volets, de voilages etc...

De manière générale, on peut dire que :

- L'orientation Sud est toujours favorable ; la façade Sud doit être pourvue d'ouvertures généreuses
- Les orientations Sud-Est et Sud-Ouest sont aussi favorables
- Les orientations Est et Ouest sont favorables l'hiver sous notre climat, mais il faut se méfier de leurs apports en saison chaude (*nécessité de protections solaires, de volets*)
- L'orientation Nord n'est jamais favorable en saison froide. Les ouvrants sur cette façade obéiront plutôt à des considérations estivales .

3.4 Les besoins énergétiques

Nous considérerons ici les besoins énergétiques du bâtiment pour les besoins de conditionnement de l'ambiance intérieure.

Les différentes formes d'énergie

On distingue, de manière générale, différentes formes d'énergie.

- **L'énergie utile** : est celle qui est requise pour produire, se déplacer, chauffer... etc.
- **L'énergie finale** : est celle qui est livrée à l'utilisateur sous forme de combustibles, de carburants, d'électricité ...
- **L'énergie primaire** : est celle qui est puisée dans les gisements d'énergies fossiles, dans les sources d'énergies renouvelables ou dans l'énergie de constitution de la matière (*nucléaire*). On la comptabilise généralement en " tep ".

Dans le cas du conditionnement des locaux, l'énergie utile est la quantité de chaleur qu'il faut fournir (*retirer*) au bâtiment pour y maintenir une température de consigne fixe. L'énergie finale de chauffage peut être sous forme de combustible (*gaz, fuel, ...*) ou d'électricité. L'énergie finale de rafraîchissement est pratiquement toujours de l'électricité. Connaissant l'énergie utile et le rendement ou le coefficient de performance des installations, on peut calculer l'énergie finale nécessaire pour le conditionnement. Enfin, on peut remonter à l'énergie primaire requise, moyennant la connaissance des rendements des filières de transformation de la source primaire vers l'énergie finale considérée.

Les besoins en énergie utile

On entend par besoins en énergie utile de chauffage ou de climatisation, la quantité d'énergie utile qui serait nécessaire pour maintenir l'ambiance intérieure à la température de consigne de chauffage ou de climatisation, et cela compte tenu du régime dynamique et des apports gratuits utiles l'hiver, ou effectifs l'été.

Puissance des équipements à installer

En saison froide, un bilan instantané du bâtiment permet d'écrire :

$$\dot{Q} = \dot{D} - \dot{A}_u + C\frac{dT}{dt} \qquad (3.5)$$

$\dot{Q}$ étant la puissance de chauffage à injecter
$\dot{D}$ étant la valeur instantanée des déperditions : $\dot{D} = GV(T_i - T_e)^+$
$\dot{A}_u$ étant la valeur instantanée du flux d'apports gratuits utiles
C Étant la capacité thermique de l'ensemble du bâtiment

Une inertie importante (C *élevée*) permet toujours de réduire la puissance des équipements de chauffage à installer.

En saison chaude, le bilan s'écrit :

$$\dot{Q} = \dot{D} + \dot{A}_{eff} - C\frac{dT}{dt} \qquad (3.6)$$

avec $\dot{D} = GV.(T_e - T_i)^+$ et $\dot{A}_{eff}$ étant la valeur instantanée du flux d'apports gratuits effectifs.

En saison chaude également, une inertie importante permet de réduire la puissance des équipements de rafraîchissement à installer.

Besoins énergétiques

L'hiver, l'intégration de l'équation (3.5) permet d'écrire :

$$C_{ch} = C_{0h} - A_u \qquad (3.7)$$

C_{ch} étant le besoin en énergie de chauffage (*énergie utile*) sur toute la saison froide
C_{0h} étant l'intégrale des déperditions, mais en tenant compte du régime dynamique, c'est-à-dire de la capacité des parois de stocker et déstocker l'excédent de chaleur.

$A_{\circ}$ étant l'intégrale des apports gratuits utiles.

Que le climat soit très froid ou modérément froid, une inertie élevée permet toujours d'augmenter la part $A_{\circ}$ des apports gratuits utiles. De plus, dans le cas d'un climat tempéré, comme celui de la Tunisie, l'inertie permet également de réduire l'intégrale des déperditions $C_{\circ\circ}$ *(parce qu'il existe des moments de la saison de chauffage pendant lesquels la température extérieure dépasse la température de consigne)*.

De même, durant l'été, on a :

$$C_{c\lim} = C_{0e} + A_{eff} \qquad (3.8)$$

L'inertie permet de réduire de manière très importante le terme de déperditions $C_{\circ\circ}$, parce que les températures nocturnes se situent très souvent en-dessous de la température de consigne. Le besoin en énergie de rafraîchissement est donc également réduit.

Chapitre 4

Evaluation des bâtiments non conditionnés

Les logements dits sociaux, et la plupart des logements économiques n'ont pas recours au chauffage continu ou à la climatisation. N'étant pas *(ou peu)* consommateurs d'énergie, on aurait pu les exclure de la réglementation. Cependant, il a été décidé de soumettre également ces logements à la réglementation pour deux raisons :

- Une raison d'ordre moral, évidente : la salubrité d'un logement et le confort thermique (*même s'il n'est pas parfait*) doivent être un droit légitime pour le grand nombre.
- Une raison d'ordre stratégique : l'amélioration du confort réalisé dans ces logements, permettra d'éviter dans de nombreux cas, le recours ultérieur et massif à des équipements fortement consommateurs.

Il restait à trouver une cible adaptée, pour la réglementation concernant cette catégorie de logements.

4.1 Principe d'un indicateur basé sur le confort

Dans les situations où le bâtiment n'est ni chauffé ni climatisé, la température intérieure fluctue librement dans un intervalle assez large (*ambiances trop chaudes ou trop froides*). Le concept d'économies d'énergie généralement adopté pour l'évaluation thermique des locaux conditionnés n'est plus valable dans ce contexte. Il a alors été décidé de prendre comme critère d'évaluation thermique du logement, la qualité de confort qu'il procure sans équipements, et qui est fonction de sa température ainsi que d'autres variables.
Une " *note de confort* " a été définie, basée sur le PPD et le PMV, index établis par Fanger, mais modifiés pour les ambiances chaudes. L'analyse de la qualité d'une ambiance passera par l'estimation de la note de confort à des intervalles réguliers sur une certaine durée.
Cependant, le classement de plusieurs variantes d'un même bâtiment nécessite la réduction de cette information à une seule valeur. On considérera alors la moyenne des notes de la séquence.

4.2 Facteurs influant sur le confort

Le corps humain est une machine thermique complexe qui, pour fonctionner correctement, doit se trouver à une température d'équilibre, très proche de 37°C. La chaleur dégagée par le métabolisme doit donc être évacuée, afin d'assurer cette température. Les échanges entre le corps humain et l'environnement se font par rayonnement, convection, évaporation et conduction (*figure 4.1*), les derniers n'intervenant que pour une faible part dans le bilan de l'organisme.

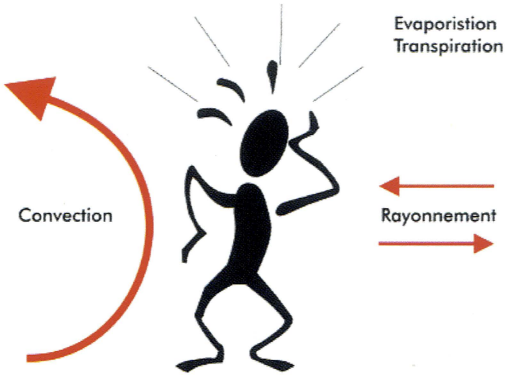


Figure 4 .1 - Echanges de chaleur thermique entre l'homme et son environnement

L'équilibre thermique est atteint lorsque le bilan thermique de l'organisme est nul, c'est-à-dire lorsque :

$$H - C_r - R_r - E_{swr} - E_{re} - D_{re} - E_d = 0 \qquad (4.1)$$

où :

- H = flux de chaleur dégagé par le métabolisme
- C_r = taux d'échange de chaleur par convection à la température réelle T_{sk} de la peau
- R_r = taux d'échange de chaleur par rayonnement à la température réelle T_{sk} de la peau
- E_{swr} = taux d'échange réel de chaleur par sudation
- E_{re} = taux d'échange de chaleur latente par respiration
- D_{re} = taux d'échange de chaleur sèche par respiration
- E_d = taux d'échange de chaleur par diffusion cutanée

On notera que les trois derniers termes du bilan sont beaucoup plus faibles que les 4 premiers, et peuvent être négligés en première approximation. Fanger a établi que pour une activité métabolique donnée, le sujet se sent en situation de confort pour des valeurs données de la température de la peau et du taux d'échange par sudation, que l'on notera respectivement T_{sk} et E_{swr}.

Cependant, la nécessité de réaliser un bilan nul conduit l'organisme à modifier la température de la peau et le taux d'échange par sudation, de manière à avoir $T_{p,}$ au lieu de $T_{p,}$ et $E_{...}$ au lieu de $E_{...}$.
Ces modifications sont une cause d'inconfort pour l'organisme, inconfort lié à la charge thermique qui pèse sur l'organisme et qui dépend de la différence L entre les pertes réelles vers l'environnement et les pertes qui auraient été réalisées si la température de la peau et le taux d'échange sudoral étaient à leurs valeurs de confort.
En écrivant les expressions de chacun des termes du bilan thermique, on s'aperçoit que la charge thermique (*et partant la sensation de confort*) dépend de six facteurs, certains étant liés à l'ambiance, d'autres à l'individu lui-même.

Les facteurs dépendant de l'ambiance sont :

- la température de l'air qui intervient sur les échanges convectifs,
- la température moyenne radiante qui intervient sur les échanges radiatifs,
- la vitesse de l'air qui intervient sur les échanges convectifs et évaporatifs
- le degré hygrométrique qui intervient sur les échanges évaporatifs.

Les paramètres dépendant de l'individu lui-même sont :

- son activité, qui détermine la chaleur générée par le métabolisme
- la résistance thermique de ses vêtements qui intervient sur les différents types d'échange.

L'action combinée de ces différents paramètres thermophysiques détermine l'impression de confort. On ne peut considérer isolément l'effet d'un seul paramètre sur l'état de confort, car l'effet de chacun dépend du niveau auquel se situent les autres.

Au cours de la première phase des études préparatoires à la réglementation [9], nous avons calculé, à partir d'un modèle de confort mis au point [7], les plages de température opérative et d'humidité, qui permettent d'avoir des conditions de confort, pour le cas de différents bâtiments résidentiels ou tertiaires, étant données les conditions habituelles des occupants (*vêture et activité*) et le niveau de confort souhaité dans cette catégorie de bâtiments. Les figures 4.2 et 4.3 donnent des exemples des diagrammes de confort qui ont été tracés suite à ces calculs.

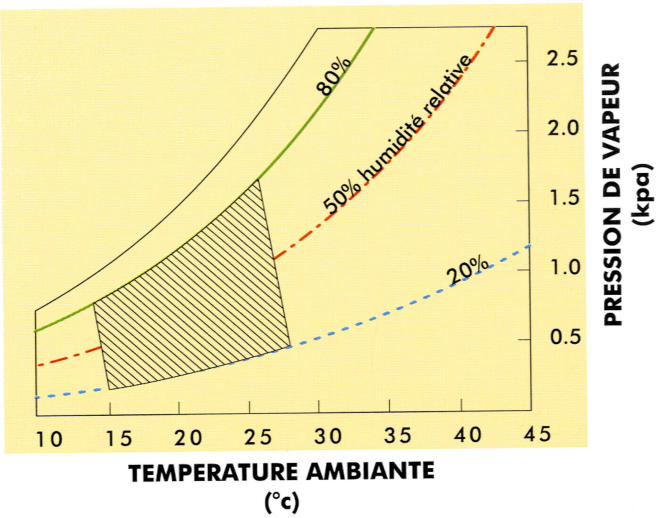


Figure 4.2 - Diagramme de confort pour bureau et espace éducatif

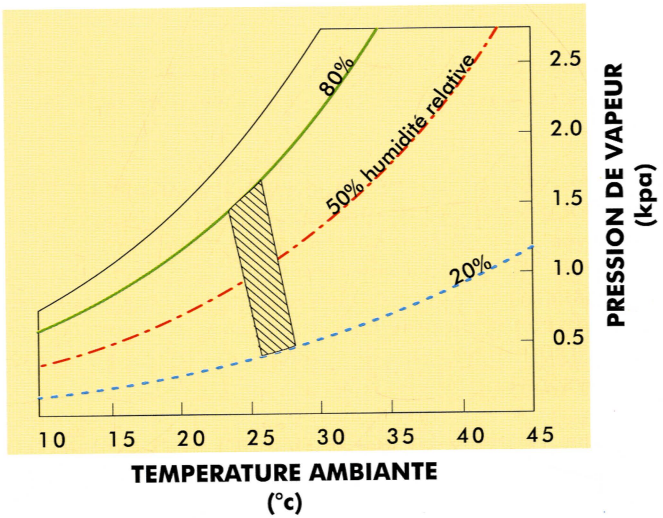


Figure 4.3 - Diagramme de confort pour hôpital jour d'hiver

4.3 Vote moyen prévisible et note de confort

D'autre part, il est bien connu que la sensation de confort comporte une part de subjectivité.
Pour arriver à une évaluation rationnelle de la qualité de l'ambiance, on utilise l'index de sensation thermique de Fanger, établi sur la base de l'échelle psychophysique suivante :

-3	Très froid	Insatisfait parce que trop froid
-2	Froid	
-1	Frais	Satisfait
0	Neutre	
1	Tiède	
2	Chaud	Insatisfait parce que trop chaud
3	Très chaud	

La sensation thermique peut alors s'exprimer sur la base du vote prévisible moyen de la population considérée, ou PMV. Selon cette échelle, un vote de 0 correspond au confort optimal.

Le PMV exprime le degré d'inconfort du groupe pris comme un tout, mais il est difficile d'interpréter directement ce vote pour décider si une ambiance est acceptable ou pas en raison de l'aspect subjectif lié à la sensation de confort.
Plutôt que d'utiliser le PMV pour juger de la qualité d'une ambiance, il semble donc plus judicieux de déterminer le pourcentage de personnes qui seraient mécontentes (*ou au contraire, satisfaites*) de cette ambiance. A partir de résultats d'expériences faisant intervenir 1300 sujets, Fanger a établi une relation entre le PMV et le pourcentage de personnes satisfaites PPS.

Le nombre PPS qui s'exprime en pourcentage est alors considéré comme une "note de confort" attribuée à cette ambiance et décrivant sa qualité thermique. Cette conception de note de confort permet ainsi d'apprécier dans quelle mesure une ambiance est confortable ou inconfortable. Il est à noter que le PPS ne peut jamais être supérieur à 95%, quelle que soit la qualité de l'ambiance.

Nous adopterons, conventionnellement, les qualificatifs suivants :

- Note $\geq$ 90/100 : confort très satisfaisant
- 90/100 > Note $\geq$ 80/100 : confort satisfaisant
- 80/100 > Note $\geq$ 70/100 : confort acceptable
- 70/100 > Note : confort non acceptable

4.4 Enquête sur la population tunisienne

L'approche de Fanger, bien que très largement utilisée, découle de travaux en chambre climatique, où l'ambiance et les conditions opératoires sont strictement contrôlées, ce qui n'est pas une bonne représentation de la réalité. Elle ne permet pas de prendre en compte l'adaptation thermique des individus aux ambiances auxquelles ils sont confrontés. Cette approche considère que les mécanismes régulateurs jouent sur les valeurs des variables physiologiques réelles (VP) pour réaliser la condition de bilan nul *(figure 4.4)*. Mais, d'après la théorie de Fanger, les valeurs des variables physiologiques de confort (VP) seraient universelles et immuables pour un type d'activité donnée.

La température de confort souhaitée est liée à la température moyenne de l'environnement dans lequel les individus évoluent habituellement

En situation réelle, les individus ont des activités différentes, un habillement différent et des postures variées qui leur permettent de réagir différemment à des conditions d'ambiance données. L'approche adaptative, plus récente que celle de Fanger, tient compte des actions et des modifications de comportement que la personne adopte en vue d'arriver au confort thermique *(figure 4.4)*. On observe de plus que les populations de différentes régions n'éprouvent pas les mêmes sensations thermiques dans un environnement donné. La température de confort, souhaitée par un grand nombre d'individus, est ainsi liée à la température moyenne de l'environnement dans lequel ils évoluent habituellement. Les valeurs des variables physiologiques de confort (VP), c'est-à-dire de la température de la peau et de la chaleur dégagée par sudation en état de confort sont elles-mêmes modifiées *(flèche épaisse à droite, figure 4.4)*, de manière à rapprocher la sensation thermique de l'individu d'une sensation de neutralité, quand il est dans son environnement ordinaire.

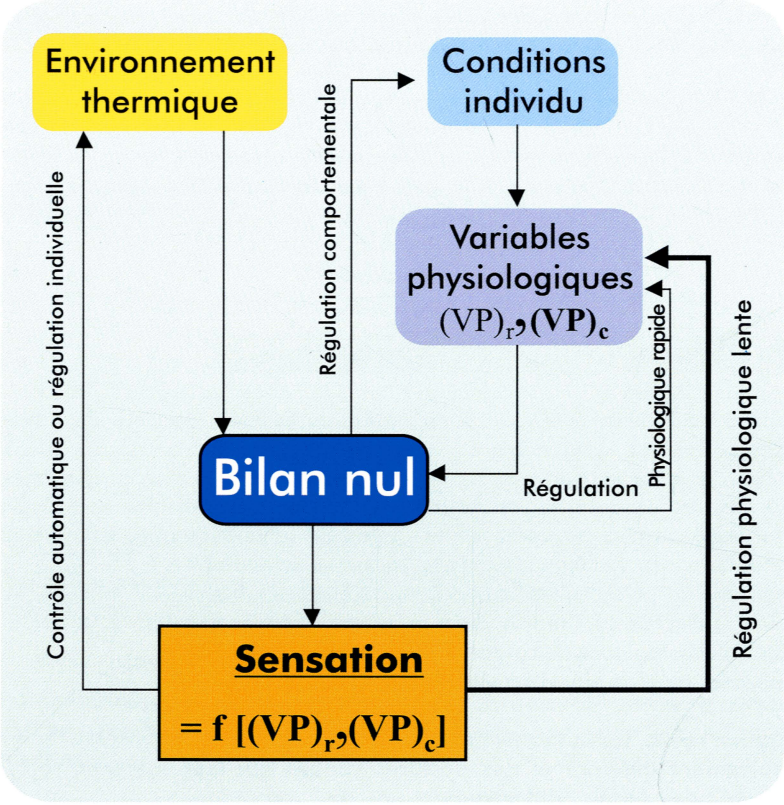


Figure 4.4 - Confort adaptatif

Les normes internationales concernant les conditions de confort ont été établies à partir d'enquêtes menées en chambre climatique, sur une population américaine. Dans le but d'améliorer les connaissances sur la sensation de confort éprouvée par une population tunisienne ou maghrébine, l'approche adaptative a été retenue, parce qu'elle tient compte des conditions réelles de vie. Ainsi, des données très hétérogènes peuvent être utilisées, les occupants ne devant pas nécessairement avoir la même activité ni le même habillement ; cela permet de prendre en considération l'acclimatation des occupants et leur adaptation par le biais de changement de stratégie (posture, vêture). L'adaptation des variables physiologiques de confort est également prise en compte.

Une enquête sur les sensations de confort de la population tunisienne, dans des conditions réelles d'occupation des locaux a été menée. Deux cent personnes ont été régulièrement enquêtées chaque mois pendant une année, cent personnes sur leur lieu de travail et cent autres à leur domicile. Les paramètres d'ambiance ont été mesurés à chaque fois, et la personne enquêtée a répondu à différentes questions concernant ses sensations de chaud et de froid, de confort et d'inconfort, et aussi ses préférences concernant la température et la vitesse de l'air.
Pour chaque enquête, nous avons alors calculé la température moyenne de confort T_c. La figure 4.5 montre la corrélation obtenue pour l'ensemble de la Tunisie entre la température de confort et la température opérative; cette corrélation s'exprime par :

$$T_c = 0{,}534\ T_{op} + 9{,}80 \qquad (4.2)$$

Ceci signifie que pour des températures opératives de l'ordre de 20°C, la valeur de cette température est responsable environ pour moitié de la valeur de la température de confort. La relation entre la température de confort et la température extérieure moyenne $T_{...}$ est donnée par :

$$T_c = 0{,}50\ T_{ext} + 12{,}16 \qquad (4.3)$$

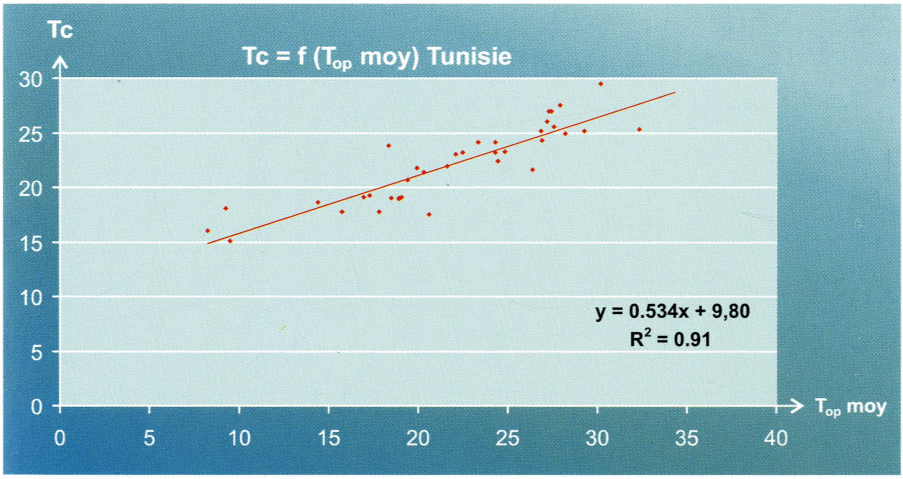


Figure 4.5 - Relation entre température de confort et température opérative

L'analyse détaillée des résultats a permis de distinguer deux zones climatiques :

- La zone côtière avec Tunis, Sfax et Gabès. Dans cette zone, la sensibilité des habitants à la température change du nord vers le sud. Cette sensibilité est exprimée par le coefficient de régression des droites d'ajustement.

- La zone continentale avec le Kef et Gafsa. Les habitants de cette zone se caractérisent par une forte adaptation aux changements climatiques qui sont assez importants entre le jour et la nuit et entre l'hiver et l'été.

Une conclusion importante qui se dégage à partir du traitement des données de cette enquête est l'aspect adaptatif du confort thermique. Cette conclusion se manifeste à travers les résultats suivants :

- L'utilisation de filtres sur les habits et l'activité des sujets permet d'obtenir des régressions plus robustes pour la relation entre S et T_{op} et aboutit à l'obtention de températures de confort plus vraisemblables

- Les sujets supportent mieux la chaleur en automne qu'au printemps. Ceci à cause de l'adaptation qu'ils ont développée suite aux trois mois d'été.

- Les températures de confort augmentent d'ouest en est et du nord vers le sud

Deuxième Partie

La réglementation thermique et énergétique tunisienne

Chapitre 5

Le contexte tunisien

Pour qu'une réglementation thermique et énergétique des bâtiments soit respectée par les professionnels, il faut qu'elle soit bien adaptée au contexte dans lequel elle sera appliquée et surtout au contexte climatique de la région d'application.

5.1 Caractéristiques climatiques générales

Contrairement au climat des régions de grande latitude qui ne présente de rigueurs climatiques qu'en saison froide, ou au climat des régions tropicales qui ne présente de rigueurs qu'en saison chaude, le climat maghrébin suscite des besoins de chauffage l'hiver, et aussi de rafraîchissement l'été.

Par ailleurs, le rayonnement solaire est plus intense qu'en Europe, ce qui représente un atout en saison froide, mais un gros problème en saison chaude. Toute conception architecturale doit alors veiller à se concilier le climat durant les deux saisons. L'évaluation des performances d'un bâtiment devra concerner les deux saisons. Ceci constitue une particularité importante du contexte maghrébin.
Cela dit, bien que le climat tunisien nécessite du chauffage l'hiver et de la climatisation l'été, il est relativement tempéré.

- **En saison froide**, la température extérieure T_e peut dépasser la température de consigne T_{ch}. Si le bâtiment a une certaine capacité thermique, cela peut contribuer à réduire la charge de chauffage. Pour tenir compte de cela, nous introduisons deux types de degrés-heures froids, qui interviennent pour le chauffage :

$$DH_f = \int (T_{ch} - T_e) dt \qquad (5.1)$$

et

$$DH_f^+ = \int (T_{ch} - T_e)^+ dt \qquad (5.2)$$

l'indice supérieur "+" signifiant que seules les quantités positives sont considérées.

- **En saison chaude**, la température extérieure T_e est très souvent (*la nuit surtout*) inférieure à la température de consigne T_{ce}. Cela représente un potentiel de refroidissement conséquent. Nous définirons deux types de degrés-heures pour le refroidissement également :

$$DH_c = \int (T_e - T_{ce})dt \qquad (5.3)$$

$$DH_c^+ = \int (T_e - T_{ce})^+ dt \qquad (5.4)$$

5.2 Le zonage climatique

Pour que les exigences réglementaires tiennent compte des différences climatiques entre les régions du pays, il a été décidé de procéder au découpage de la Tunisie en zones climatiques.
L'identification des contours de ces zones [9] a été basée sur les normales de certains paramètres climatiques pour chacune des deux saisons (*saison de chauffage et saison de rafraîchissement*). Les normales de ces grandeurs, calculées sur la période 1970 à 1985 , nous ont été communiquées par l'Institut National de Météorologie.
Les paramètres qui ont été considérés sont les suivants :

Pour la saison froide :

- Normale de la somme des degrés-jours de chauffage, base 16°C **DJCH**
- Normale de la température minimale quotidienne **TN**
- Normale de l'humidité relative moyenne **HN**
- Normale de l'irradiation globale quotidienne sur le plan horizontal **GN**
- Normale de la durée quotidienne d'ensoleillement **IN**

Pour la saison chaude :

- Normale de la somme des degrés-jours de climatisation, base 26°C **DJCL**
- Normale de la température maximale quotidienne **TX**
- Normale de l'humidité relative moyenne **HX**
- Normale de l'irradiation globale quotidienne sur le plan horizontal **GX**
- Normale de la durée quotidienne d'ensoleillement **IX**

Il a été décidé de retenir deux niveaux de découpage :

- **Un découpage global**, comprenant de grandes régions, qui pourront avoir des traitements différenciés en ce qui concerne la réglementation.
- **Un découpage plus fin**, pour tenir compte des différences bioclimatiques, qui se reflètent sur les architectures régionales.

Pour effectuer le découpage, les isolignes correspondant aux données climatiques, ont été superposées à une carte des régions naturelles (*relief, composition géologique* ...) et une carte des gouvernorats. Il s'est avéré que les différents isolignes épousaient assez bien les contours des régions naturelles. Par contre, les frontières des gouvernorats ne respectent souvent pas l'existence de ces entités naturelles. Cela particulièrement dans le Nord du pays, où isolignes et régions naturelles présentent des lignes parallèles au littoral, alors que les frontières des gouvernorats lui sont transversales (*Bizerte, Béja, Jendouba*). Pour des raisons évidentes, le principe suivant a été adopté :

> **« Les frontières des régions reconnues par la réglementation doivent coïncider avec les frontières de gouvernorat. »**

Cela dans le but de ne pas soumettre des localités appartenant à un même gouvernorat, à des réglementations différentes.

En revanche, le découpage relatif à l'étude régionale et aux **recommandations** se base sur les frontières des **délégations**.

Cette démarche a abouti aux résultats suivants [2].

Trois grandes régions pour la réglementation

L'analyse des normales fournies par l'INM et des isocontours qui les représentent, montre que la variable qui permet le meilleur regroupement de gouvernorats voisins en ensembles ayant des niveaux homogènes, est la température maximale d'été TX. Ce critère de découpage permet d'avoir des ensembles assez homogènes en ce qui concerne les autres paramètres.
La figure 5.1 montre les trois grandes régions ainsi identifiées, qui sont:

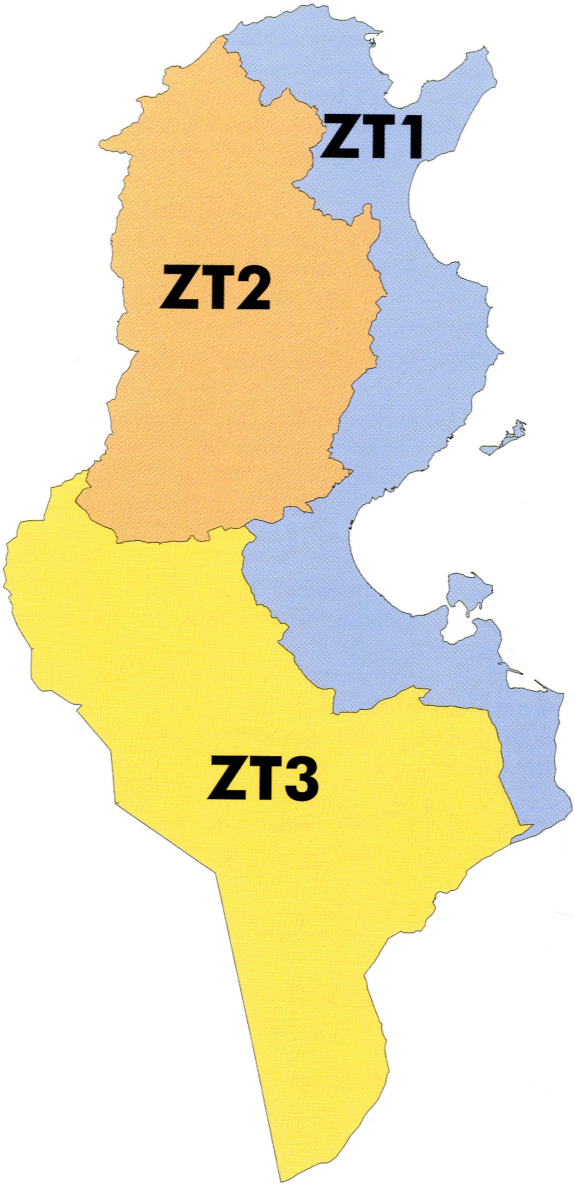


Figure 5.1 - Les trois régions définies pour la réglementation

- **ZT1. La zone méditerranéenne**
  Elle regroupe les gouvernorats de Bizerte - Tunis - Ben Arous - Ariana - Nabeul - Zaghouan - Sousse - Monastir - Mahdia - Sfax - Gabes - Médenine.

- **ZT2. Les hauts-plateaux du Nord**
  Gouvernorats de : Jendouba - Béja - Siliana - Le Kef - Kairouan - Kasserine - Sidi Bouzid - Gafsa.

- **ZT3. Les hauts-plateaux du Sud**
  Gouvernorats de Tataouine - Kebili - Tozeur.

Dix zones pour l'étude régionale et les recommandations

Ce zonage n'obéit pas seulement à des considérations climatiques, mais aussi géographiques (*relief, composition géologique, ressources naturelles* ...) et socio-économiques, qui ont abouti à une certaine différenciation au niveau de l'architecture traditionnelle. La figure 5.2 montre les dix sous-régions identifiées, caractérisées par des architectures spécifiques, et qui sont :

RT1 : Les plateaux du Nord-Est
Nous désignons par cette région, les villages andalous qui se trouvent dans la région de Bizerte.

RT2 : Les plaines du Nord-Est
Cette région regroupe les gouverorats de Tunis, Ariana, Ben Arous, Zaghouan et Nabeul.

RT3 : Les plaines du Centre Est
Elle regroupe les gouvernorats de Sousse, Monastir, Mahdia et Sfax.

RT4 : Les plaines du Sud-Est
Cette région désigne les gouvernorats de Gabès et Médenine.

RT5 : Les plateaux du Nord-Ouest
Il s'agit des gouvernorats de Jendouba et Béja.

RT6 : Les montagnes du Nord-Ouest
Cette région qui comprend les gouvernorats du Kef et de Siliana est caractérisée par des hivers très froids qui se répercutent clairement sur l'architecture locale.

RT7 : Les plaines du Centre Ouest
Elle regroupe les gouvernorats de Kairouan, Kasserine et Sidi Bouzid.

RT8 : Les plateaux et les montagnes du Sud-Ouest
Cette région comprend le gouvernorat de Gafsa et les oasis de montagne qui s'y trouvent.

RT9 : Les oasis de montagne
Il s'agit des gouvernorats de Tozeur et de Kebili.

RT10 : Les plaines désertiques du Sud
Cette région comprend le gouvernorat de Tataouine, ainsi que les délégations de Médenine et de Matmata. Elle se caractérise par un climat très continental et très chaud.

Pour plus de détails, on se reportera à l'étude réalisée par des architectes de l'ITAAUT concernant l'analyse régionale de l'architecture tunisienne sous l'angle bioclimatique [10].

La comparaison des cartes des régions définies pour la réglementation et des régions identifiées pour les recommandations met en évidence les correspondances suivantes :

ZT1 = RT1 + RT2 + RT3 + RT4
ZT2 = RT5 + RT6 + RT7 + RT8
ZT3 = RT9 + RT10

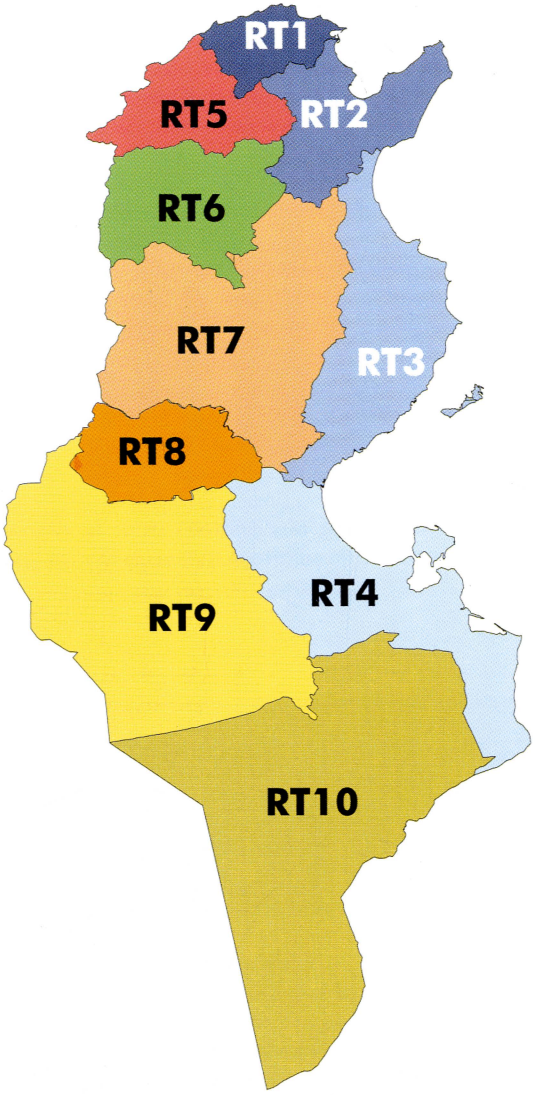


Figure 5.2 - Les dix régions identifiées pour les recommandations

5.3 Les stratégies de conditionnement en Tunisie

Quatre types de stratégies se présentent dans le secteur résidentiel ; ils ont donné lieu chacun à des études préparatoires spécifiques :

- Logement non équipé
- Logement avec équipement de chauffage léger
- Logement avec équipement de chauffage lourd
- Logement avec équipement de chauffage lourd et climatiseurs

L'objectif des études préparatoires était de déterminer les améliorations et les variantes architecturales les plus performantes pour chaque type de stratégie. Nous allons voir ci-dessous le critère d'évaluation qui a été retenu dans chaque cas.

Logement non équipé

Ce type de logement qui n'est ni chauffé, ni climatisé, représente encore le cas le plus répandu dans le parc actuel. Pour le logement non équipé, le critère d'évaluation de la qualité thermique du bâtiment est basé sur un confort minimal à obtenir de manière naturelle et non sur des économies d'énergie à réaliser.
En effet, dans le contexte climatique tunisien et en tenant compte des concepts de l'architecture bioclimatique, les équipements de chauffage et de climatisation ne sont pas indispensables pour la réalisation d'un confort de qualité acceptable. Ainsi, un bâtiment non équipé sera jugé performant s'il réalise un certain confort thermique sans le recours à des moyens de chauffage ou de climatisation.

Logement avec équipement de chauffage léger

Un comportement très répandu consiste à chauffer un logement initialement non équipé à l'aide d'un équipement d'appoint léger tel que les radiateurs électriques à bain d'huile, par exemple.
La contrainte imposée pour les études préparatoires est la suivante: on s'intéresse uniquement aux variantes de logements non équipés pour lesquelles la note de confort moyenne mensuelle en été est supérieure à 80%. Les variantes trop inconfortables l'été seront éliminées, puisque ces logements ne seront pas climatisés. La régulation du chauffage se fait sur le PMV de manière à avoir une note de confort qui soit supérieure à 80%, de 18 h à 22 h.
Une étude technico-économique concernant les performances thermiques, énergétiques et économiques du bâtiment de référence et des différentes variantes a été réalisée. Les performances thermiques d'une variante donnée ont été obtenues grâce à la simulation thermique.

On a considéré dans ce cas, deux critères d'évaluation de la qualité thermique du bâtiment : le premier est basé sur la consommation d'énergie ainsi que sur le coût total qui inclut le prix de la construction, le prix de l'équipement de chauffage et celui de l'énergie consommée. Le second sur la note moyenne de confort durant toute la journée (*la consigne n'étant appliquée que de 18 h à 22 h*).

Logement avec équipement de chauffage lourd

Les travaux menés sur la qualité du confort obtenu dans différents types de logements tunisiens ainsi que l'analyse de l'influence des matériaux de construction sur le degré de confort et les besoins de chauffage et de climatisation montrent que des besoins de chauffage réduits certes, mais réels, existent.
En effet, la qualité du confort thermique est médiocre, plus particulièrement pendant l'hiver. Or, l'évolution des modes de vie se traduit par une demande croissante de l'amélioration du confort thermique dans les bâtiments, et le chauffage central, s'il a été jusque-là réservé aux logements de standing, tend à se généraliser.
Les critères d'évaluation sont l'énergie de chauffage et le coût total, qui comprend le coût de l'investissement *(coût de la construction et coût de l'installation de chauffage)* et le coût de l'énergie de chauffage.

Logement avec équipement de chauffage lourd et climatisation

L'usage de climatiseurs devient aussi de plus en plus fréquent. Nous les prendrons donc en considération pour les logements de standing. Il est à signaler cependant que l'installation du chauffage central précède généralement celle des climatiseurs.
Pour les logements de standing, le critère d'évaluation de la qualité thermique du bâtiment sera basé sur le niveau de consommation d'énergie de chauffage, d'énergie de climatisation, ainsi que sur le coût total incluant le coût de la construction, celui des équipements *(chauffage et climatisation)* ainsi que celui de l'énergie pour les deux saisons.

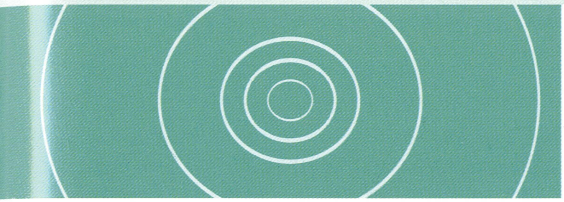
Remarquons que même pour les deux dernières catégories de logements (*équipés de chauffage lourd seulement ou de chauffage et de climatiseurs*), la température n'est généralement pas fixe sur une saison.

En effet, le mode opératoire est le suivant :

Durant l'hiver, une température de consigne T_{ch} est appliquée comme un seuil minimum uniquement ; la température intérieure peut dépasser ce seuil ($T_i > T_{ch}$).

Durant l'été, la température de consigne T_{cl} est un seuil maximum uniquement ; la température intérieure est autorisée à descendre au-dessous de ce seuil ($T_i < T_{cl}$).

Chapitre 6



Le processus réglementaire et les études préparatoires

6.1 Nécessité de la réglementation

Les besoins de confort thermique devenant plus importants avec l'amélioration du niveau de vie, on assiste depuis deux décennies à une augmentation croissante des équipements de chauffage dans les logements, et à l'apparition de plus en plus fréquente de climatiseurs. Cette mutation ne s'accompagne malheureusement pas d'une amélioration de la qualité thermique de l'enveloppe. Il en résulte une consommation énergétique en très forte croissance, et l'apparition de pics très importants de puissance électrique, liés à l'utilisation des climatiseurs, notamment aux heures les plus chaudes des journées estivales.

Il s'ensuit que, si le secteur résidentiel et tertiaire est aujourd'hui le troisième en termes de consommation d'énergie (*derrière l'industrie et le transport*), les études prospectives montrent qu'il deviendra le 2ème en 2010 (*devançant le transport*), et le premier en 2020 (*devançant même l'industrie*) [3].

Or, le climat tunisien étant relativement tempéré, il offre les moyens de réaliser une ambiance thermique confortable en toute saison, et pour une faible consommation énergétique, pour peu que l'enveloppe thermique du bâtiment soit correctement conçue, notamment en ce qui concerne une isolation thermique minimale, des éléments d'inertie bien distribués, et des éléments de captation solaire bien contrôlés.

Cependant, la mutation vers une qualité de construction améliorée ne se fera pas spontanément pour les raisons suivantes :

- Le secteur de la construction est un secteur relativement conservateur.
- Le maître d'ouvrage d'un logement n'est pas toujours le futur occupant.
  Le promoteur immobilier cherche à réduire le coût de production du logement, et se désintéresse des frais d'exploitation futurs, ou de la qualité du confort.
- Même quand le maître d'ouvrage est le futur occupant, il est soumis à des contraintes financières *(particulièrement quand il a recours à un crédit, par exemple de la Banque de l'Habitat)* assez strictes, qui le poussent à chercher la réduction des coûts de construction, reléguant au deuxième plan, les coûts futurs d'exploitation.
- Les connaissances et l'information concernant les aspects thermiques et énergétiques des bâtiments, sont très insuffisantes, aussi bien chez les professionnels du bâtiment, que dans le public.

C'est pour ces raisons que la mise en place d'une réglementation thermique tunisienne des bâtiments a été décidée. La réglementation, instrument efficace pour garantir la qualité thermique de la construction, devrait promouvoir les aspects positifs de la construction traditionnelle ainsi que ceux d'une construction plus moderne. Bien entendu une contrainte de surcoût maximal au niveau de l'investissement initial devrait être respectée. Parmi les avantages qui découleront de l'application de la réglementation, on peut citer:

- Des économies d'énergie de chauffage et de climatisation, qui permettraient d'amortir rapidement le surcoût à l'investissement
- Une réduction des émissions de gaz à effet de serre, ce qui aiderait la Tunisie dans ses efforts pour le respect des accords de Kyoto
- Une économie sur les équipements de chauffage / climatisation, puisque les puissances à installer seront moins importantes (*cette économie vient en déduction du surcoût à l'investissement*)
- Une meilleure qualité de confort thermique (*notamment des températures de surface plus agréables*)
- Une meilleure santé du bâtiment (*pas de risque de condensation notamment*)

6.2 Nature de l'exigence réglementaire

Une réglementation de type performantiel (*plutôt que normatif*) a été retenue laissant plus de marge à la liberté créatrice du concepteur. Le problème est alors de savoir quel sera concrètement l'objectif performantiel visé par la réglementation. Les réglementations classiques sont basées sur une consommation d'énergie à ne pas dépasser pour assurer des conditions de consigne correspondant à des normes de confort. Ce concept est pertinent pour des bâtiments conditionnés.

Pour les logements non équipés

Un objectif de consommation d'énergie n'aurait pas de sens pour ces bâtiments. Dans ce cas, la réglementation sera basée sur une qualité de confort minimale à réaliser par le bâti de manière naturelle. Dans le cas où un niveau de confort plus élevé serait ultérieurement demandé, cette exigence entraînera des économies d'énergie et des équipements moins coûteux.

Pour les logements équipés et les bâtiments du secteur tertiaire

Dans ce cas, la cible réglementaire sera liée à la réduction de la consommation énergétique de chauffage et de climatisation pour assurer les conditions de consigne.

On parlera alors de réglementation thermique dans le cas des logements non équipés, la cible étant l'amélioration du niveau de confort, et de réglementation énergétique dans le cas des bâtiments équipés, la cible étant la réduction de la consommation d'énergie. Cependant, nous verrons plus bas que, dans le cadre de la réglementation dite minimale, on adoptera dans un premier temps et par souci de simplicité, une cible unique pour tous les bâtiments.

Un point essentiel est que, dans tous les cas, les cibles réglementaires devront concerner les deux types de rigueur climatique (*saisons froide et chaude*).

6.3 Le processus de préparation de la réglementation

Pour qu'une réglementation thermique et énergétique des bâtiments soit respectée par les professionnels, il faut:

- Qu'elle soit bien adaptée au contexte dans lequel elle sera appliquée tant du point de vue climatique, que socio-économique et technique,
- Qu'elle ne représente pas un changement trop brutal des habitudes de construction,
- Que les bénéfices résultant de son application aient été démontrés,
- Que les professionnels du bâtiment se l'approprient.

C'est pour satisfaire à ces conditions que la procédure de mise en place de la réglementation thermique et énergétique en Tunisie a été organisée en trois processus, présentés ci-dessous.

Un processus d'études préparatoires de la réglementation

Ce processus est nécessaire pour garantir le fait que la réglementation proposée soit bien adaptée à son contexte. Il a pour objectif de partir du constat de l'existant, et de voir dans quelle mesure les pratiques de construction peuvent être modifiées de manière réaliste pour arriver à de meilleures performances, ce qui permet de déterminer une exigence réglementaire qui soit réalisable, c'est-à-dire qui représente un bon compromis entre les performances thermiques et énergétiques, le surcoût de construction, et les changements dans les habitudes de construction.

Ce processus a été organisé en deux étapes:

- **Une première étape (*1991 à 1993*)** visait à rassembler les outils et les données nécessaires aux études d'évaluation de la 2ème phase.
  Elle a permis de:

  - Définir une approche méthodologique pour l'ensemble des études et le principe de l'exigence réglementaire pour chaque catégorie de bâtiments (*résidentiels ou tertiaires*),
  - Réaliser un découpage de la Tunisie en trois zones de caractéristiques climatiques homogènes,
  - Sélectionner des décades qui soient typiques du climat de chaque mois pour cinq localités tunisiennes,
  - Etablir des diagrammes de confort permettant de trouver les conditions de consigne (*température et humidité*) souhaitables pour chaque type de bâtiment en fonction de l'activité de ses occupants, de leur vêture et du niveau de confort souhaité,
  - Identifier les matériaux de construction couramment utilisés, ainsi que leurs propriétés thermophysiques,
  - Analyser l'architecture traditionnelle de plusieurs régions d'un point de vue bioclimatique,
  - Etablir des plans-type pour servir de bâtiments de référence pour les évaluations de la 2ème étape.

- **Une deuxième étape (1996 à 2000)** a permis de:

  - Déterminer (*à l'aide d'un logiciel de simulation thermique détaillé*) les performances thermiques et énergétiques des bâtiments existants pour plusieurs plans-type représentant différentes catégories de logements (*social, économique ou standing; équipé ou non équipé, semi-collectif ou collectif etc...*)
  - Identifier des améliorations de construction réalistes (*tant du point de vue architectural que technique et économique*)
  - Proposer des variantes en combinant les différentes améliorations proposées
  - Déterminer (*toujours par simulation détaillée*) les performances thermiques et énergétiques des variantes obtenues
  - Réaliser pour chaque variante une étude économique permettant d'estimer le coût global sur l'horizon économique comme étant la somme de :
    - Surcoût d'investissement
    - Coût (*éventuel*) des installations de chauffage et de climatisation
    - Coût de l'énergie de chauffage et de climatisation (*éventuellement*) sur l'horizon économique

- A partir des résultats thermiques, énergétiques et économiques, proposer des recommandations pour chaque catégorie de bâtiments, en écartant les variantes qui représentent un surcoût trop important.

Un processus de phasage de la promulgation de la réglementation

Parmi les conditions nécessaires pour qu'une réglementation soit respectée, nous avons mentionné le fait qu'elle ne doit pas représenter un changement trop brutal des habitudes de construction.
L'objectif **final** est d'avoir une réglementation qui se traduise par des améliorations consistantes des performances thermiques et énergétiques des bâtiments. Nous appellerons cette réglementation "optimale", étant bien entendu qu'elle sera optimale pour un contexte donné (*état des techniques, considérations socio-économiques etc..*).
L'exigence réglementaire pour cette réglementation optimale sera différenciée comme on l'a vu au §6.2.

La mise en place de cette réglementation optimale nécessite plusieurs actions préparatoires:

- démonstration des avantages thermiques et énergétiques résultant de l'application de cette réglementation
- développement d'un outil simplifié pour le calcul des indicateurs liés à l'exigence réglementaire (cet outil a été développé pour les indicateurs énergétiques, mais pas encore pour les indicateurs de confort)
- formation du plus grand nombre de professionnels du bâtiment à:
  - La prise en compte des aspects thermiques et énergétiques lors de la conception d'un projet
  - La méthodologie d'évaluation thermique et énergétique du projet
  - L'utilisation de matériaux, d'équipements et de techniques de construction plus performants du point de vue thermique et énergétique.

Ces actions préparatoires nécessiteront un temps relativement long pour leur réalisation. Or, pendant ce temps, un flux important de logements est en cours de construction, et il serait dommage de ne pas chercher à les améliorer, d'autant plus que vu la durée de vie d'un bâtiment, leur qualité thermique aura un impact sur la facture énergétique du pays durant plusieurs dizaines (voire centaines) d'années. Il a donc été décidé de mettre en place dans un premier temps, une réglementation dite "minimale", dont les caractéristiques seraient les suivantes :

- elle ne doit pas exiger des changements trop importants dans les techniques de construction.

- elle ne doit pas exiger un niveau de connaissances trop élevé chez les professionnels.
- l'exigence liée à cette réglementation sera basée sur des indicateurs énergétiques, plus faciles à comprendre que les indicateurs de confort, d'autant plus qu'un outil simplifié a été développé pour le calcul des indicateurs énergétiques, mais pas encore pour le calcul de ceux de confort.

Depuis 1991, de nombreuses réunions de travail et séminaires ont été organisées avec les professionnels du bâtiment, afin d'échanger les points de vue sur ce projet de réglementation. Un projet de texte réglementaire a été rédigé sur la base des résultats des études préparatoires. Ce projet est soumis à une large concertation avec l'ensemble des acteurs de la construction, afin de tenir compte de leurs remarques et de leurs suggestions, condition nécessaire pour qu'ils puissent s'approprier la future réglementation, et par conséquent la mettre en pratique.

Un processus d'anticipation expérimentale de la réglementation

Le phasage du processus réglementaire *(réglementation minimale, puis optimale)* crée un contexte favorable à la mise en place d'un processus d'anticipation expérimentale. Ce processus est nécessaire pour:

- L'évaluation des performances sur le terrain, des améliorations préconisées par le processus réglementaire *(très utile pour la détermination des exigences de la réglementation optimale)*
- La démonstration des avantages et des économies qui découlent de l'ensemble des techniques améliorées *(produits, systèmes et procédés)*
- La formation sur le terrain des concepteurs de bâtiments (*architectes et ingénieurs*)
- L'entraînement des corps de métier du bâtiment à la mise en œuvre des techniques de construction améliorées

Durant le processus d'anticipation expérimentale, deux types d'exigences coexisteront:

- des exigences correspondant à la réglementation minimale, qui seront obligatoires dès que cette réglementation sera promulguée
- des exigences plus élevées (*facultatives*) liées à la définition d'un label de haute performance thermique et énergétique des bâtiments neufs, dans les deux secteurs (*résidentiel et tertiaire*). La satisfaction des exigences du label donnera droit à l'attribution d'avantages financiers sur le surcoût de construction.

Un suivi thermique sera réalisé sur des bâtiments concernés par le processus d'anticipation expérimentale, et le label. Les résultats obtenus au cours de ce suivi permettront d'ajuster les exigences qui étaient celles du label, pour définir les exigences de la future réglementation optimale.

6.4 Synthèse des résultats des études préparatoires et recommandations

La réglementation thermique et énergétique devra concerner les bâtiments quel que soit le lieu de leur implantation en Tunisie. Cependant, le comportement thermique d'un bâtiment est étroitement lié aux caractéristiques climatiques du site de son implantation. C'est pourquoi il est indispensable d'acquérir des connaissances sur ce comportement dans différentes régions tunisiennes.
Rappelons qu'au cours de la première phase de cette étude, la Tunisie a été divisée en trois zones climatiques pour les besoins de la réglementation (§5.2).

Nous avons donc sélectionné Tunis et quatre autres sites, équipés de stations météorologiques, pour y effectuer des études thermiques et énergétiques poussées; notre choix a été dicté à la fois par des considérations climatiques, et des considérations pratiques : disponibilité des mesures d'éclairement global et diffus, enregistrées par l'Institut National de Météorologie, sur de longues séries.

Les sites ainsi sélectionnés sont :

Tunis :	Zone 1
Bizerte :	Zone 1
Gabès :	Zone 1
Jendouba :	Zone 2
Gafsa :	Zone 2

Pour chacune de ces stations, l'INM a mis à la disposition du projet les données quotidiennes suivantes, sur les 5 années, allant de 1985 à 1989 :

- Température extérieure moyenne.
- Irradiation globale quotidienne.

Sur la base de ces données, et suivant la méthodologie établie durant la première étape du projet [9], nous avons procédé à la sélection d'une décade typique du climat de chaque mois de l'année, pour chacune des quatre régions.
Les décades de janvier et de juillet ont été utilisées pour analyser le comportement des bâtiments en saison froide et en saison chaude respectivement.

Nous présentons la synthèse des résultats qui pourront servir de recommandations aux concepteurs, en fonction de la région d'implantation du bâtiment.

Caractérisation climatique de chaque région

Au vu des données concernant les normales des températures saisonnières, les amplitudes quotidiennes de température, les degrés-heures froids, les degrés-heures chauds, et les irradiations solaires saisonnières, nous allons présenter la synthèse des caractéristiques du climat de chaque site en commençant par les plus chauds et/ou ensoleillés.

Gabès

Gabès bénéficie d'un climat maritime, caractérisé par de faibles amplitudes journalières de température, été comme hiver. L'irradiation solaire y est élevée, surtout l'été. L'hiver, ce site est le moins froid des cinq sites considérés, et l'été, il est moyennement chaud (*c'est le 3ème*).

Tunis

Elle bénéficie aussi d'un climat maritime, quoique moins marqué que celui de Gabès. L'irradiation solaire y est moyennement élevée en hiver. Le climat est relativement tempéré, hiver comme été.

Bizerte

D'après les amplitudes de température, c'est un site qui a un climat moins maritime que celui de Gabès ou de Tunis, mais bien sûr, plus maritime que ceux de Gafsa ou de Jendouba. Le rayonnement solaire est assez faible l'hiver, et moyen l'été. L'hiver, il y fait moyennement froid, et l'été pas trop chaud.

Jendouba

C'est un climat **très** continental, marqué par les amplitudes journalières de température, les plus fortes. Le rayonnement solaire y est assez faible l'hiver, et moyen l'été. L'hiver se caractérise par un climat très froid, et l'été par un climat très chaud.

Gafsa

C'est aussi un climat très continental (les amplitudes quotidiennes y sont moins fortes qu'à Jendouba, mais les différences été - hiver y sont plus marquées). Le rayonnement solaire **est le plus intense** durant l'hiver. L'hiver est très froid, et l'été très chaud.

Etude des bâtiments non conditionnés

Rappelons que pour ce type de bâtiments, l'indicateur de performances retenu est la note de confort moyenne (*note sur 100*), réalisée par le bâtiment sans recours à des équipements. Nous présentons ici une synthèse rapide des résultats de cette étude.

Tunis

Le logement de référence présente un confort insatisfaisant l'hiver (*~62 points*); l'été, le confort de l'étage supérieur est insatisfaisant (*65*), mais celui de l'étage intermédiaire est satisfaisant.

L'augmentation de la surface vitrée produit une amélioration remarquable en saison froide (*~13 points*), et une petite amélioration en saison chaude, en supposant que les volets des fenêtres ensoleillées sont fermés. Elle est donc à adopter sans hésitation.

L'isolation de la toiture est défavorable l'hiver si les vitrages ont les dimensions de référence, mais favorables avec de grands vitrages. L'été, elle entraîne une amélioration spectaculaire (*+21 points*), et doit donc être impérativement adoptée.

L'isolation des murs est légèrement bénéfique l'hiver (*+2 points*); l'été, elle n'est pas bénéfique si la toiture n'est pas isolée, mais favorable si elle l'est. Le principe d'isolation de la toiture étant retenu, on aura donc intérêt à isoler les murs.

L'augmentation de l'inertie du plancher apporte une légère amélioration l'été, et aussi l'hiver, à condition que les vitrages soient agrandis. Cependant, cette amélioration coûte relativement cher, par rapport à l'amélioration des performances qu'elle entraîne, et on pourra donc s'en passer.

Si l'on adopte l'isolation de la toiture et des murs et l'agrandissement des vitrages, on arrive à des notes moyennes d'environ 80 points (*satisfaisant*) l'hiver, et 86 points l'été (*satisfaisant également*). Cela signifie qu'à Tunis, on pourrait se passer d'équipements, moyennant une bonne conception.

Gabès

Le logement de référence présente un confort à peine acceptable l'hiver (*~72*) et franchement insupportable l'été pour l'étage supérieur (*~35*).

L'augmentation de la surface vitrée améliore nettement les performances d'hiver (*~ +11*), et légèrement celles d'été (*+3*); elle doit donc être retenue.

L'été, l'isolation de la toiture produit un effet particulièrement spectaculaire (*+38 à elle seule !*). En hiver, son effet, seule, est défavorable, mais favorable en présence de grands vitrages.
L'isolation des murs est toujours favorable l'hiver; elle l'est l'été, si la toiture est isolée; on a donc intérêt à la pratiquer.
L'inertie du plancher n'est guère utile.
La variante (*M + T + V*) qui combine murs et toiture isolés, et vitrages agrandis, permet d'avoir une note de l'ordre de 86/100 (*confort nettement satisfaisant*) hiver comme été. Ainsi, à Gabès comme à Tunis, on pourra se passer d'équipements de conditionnement, si l'on se contente d'un confort satisfaisant, et moyennant l'adoption des mesures d'amélioration citées. Il convient d'insister sur l'importance de l'isolation de la toiture, particulièrement à Gabès, à cause de l'irradiation solaire très intense. Sans toiture isolée, le logement supérieur est moins confortable à Gabès qu'à Jendouba, mais plus confortable en cas de toiture isolée.

Bizerte

L'hiver, le logement de référence n'est absolument pas confortable (*note ~50*). L'été, le confort de l'étage supérieur est supportable (*~63*), et celui de l'étage intermédiaire, satisfaisant (*~83*).
L'agrandissement des vitrages est très favorable l'hiver (*+15*), et légèrement favorable l'été. L'isolation de la toiture (*désavantageuse l'hiver, si les vitrages sont petits*) est très efficace l'été (*~ +20*).
L'inertie du plancher est inutile l'hiver, et même défavorable l'été; on ne l'adoptera pas.
L'isolation des murs est bénéfique l'hiver (*~+2*), et aussi l'été, quoique moins qu'ailleurs.
La variante (*M + T + V*) permet d'atteindre une note de 71/100 l'hiver et de 86/100 l'été, ce qui montre qu'un équipement de chauffage sera nécessaire, mais pas un équipement de conditionnement.

Jendouba

L'hiver, le logement de référence n'est pas confortable (*~ 50/100*), l'été non plus, l'étage supérieur étant franchement insupportable (*~ 38/100*), et l'étage intermédiaire peu satisfaisant (*~ 69/100*).
L'augmentation de l'inertie du plancher est inutile l'hiver, mais améliore les performances d'été pour l'étage intermédiaire. Cependant, on pourra se passer de l'adopter à cause de son coût élevé.
La variante (*M + T + V*) permet d'atteindre une note d'environ 72/100 l'hiver et 66/100 l'été. Cela signifie que dans ce climat continental, un logement même de bonne qualité thermique, devra être chauffé l'hiver (*pour un confort satisfaisant*) et climatisé l'été.

Gafsa

L'hiver, le logement de référence est loin d'être satisfaisant (*note ~ 50/100*). Quant à l'été si le logement intermédiaire est insupportable (*46/100*), l'étage supérieur (*~18/100*) est un véritable enfer…
L'hiver, l'agrandissement des vitrages (*nuisible l'été*) induit une très grande amélioration des performances (*~ +18*).
L'isolation de la toiture (*pas intéressante l'hiver si les vitrages sont petits*) apporte une amélioration spectaculaire l'été (*+23 points*).
La variante (*M + T + V*) permet d'atteindre environ 74 points l'hiver, dépassant Bizerte et Jendouba (*alors que le logement de référence de Gafsa est moins bon que dans ces deux localités*), et environ 42 points l'été…
On voit ainsi qu'à Gafsa, un logement, même s'il est bien conçu thermiquement, ne pourra pas se passer de chauffage l'hiver (*pour un confort satisfaisant*), et surtout de conditionnement d'air en saison chaude. Cela est dû au climat très continental de Gafsa, qui fait que le nombre de degrés-heures froids et de degrés-heures chauds y sont plus élevés qu'ailleurs. Cela ne doit pas faire perdre de vue l'importance toute particulière de l'agrandissement des vitrages et de l'isolation de la toiture dans ce climat, étant données les améliorations très consistantes qu'elles entraînent (*inconfort moins important, et nous le verrons au paragraphe suivant, économies d'énergie*).

Bâtiments chauffés et non climatisés

Nous nous intéressons ici aussi bien au cas du chauffage léger, utilisé de manière intermittente (*de 18h à 22h seulement*), qu'à celui du chauffage central, utilisé en permanence. Rappelons que les indicateurs de performances considérés dans ce cas sont les consommations d'énergie et les coûts globaux.

Tunis

- Le surcoût lié à l'agrandissement des vitrages et à l'isolation des murs induit des économies d'énergie consistantes, et est bien rentabilisé sur le plan économique.
- L'hiver, l'isolation de la toiture est bénéfique en cas de chauffage continu seulement. Cependant, si le bâtiment doit être occupé l'été, cette isolation est impérative.
- Des équipements de chauffage léger permettent d'avoir un confort globalement satisfaisant sur l'ensemble des 24 heures, seulement si les vitrages sont agrandis et /ou les murs isolés.
- L'isolation des murs est bénéfique, que ce soit en cas de chauffage léger ou de chauffage central. Dans le cas d'un chauffage au gaz, la double cloison avec lame d'air est la solution la moins intéressante sur le plan économique, quel que soit le taux d'enchérissement du gaz.
- D'un point de vue économique, toutes les variantes améliorées qui n'ont pas de plancher lourd, sont plus rentables que le cas de référence et cela quel que soit le scénario d'évolution du prix de l'énergie.

Gabès

- Très particulièrement dans cette localité, on constate une très grande variation des besoins de chauffage suivant la qualité thermique du logement (*de 6.0 kWh/m² à 16.3 kWh/m²*). En effet, dans ce climat doux et ensoleillé, l'isolation des murs et l'agrandissement des vitrages permettent de limiter fortement les déperditions, et d'en compenser une grande partie (*la moitié environ*).
- Toutes les variantes avec vitrages agrandis permettent d'obtenir un confort globalement satisfaisant (> *85/100*) dans le cas où des équipements de chauffage léger sont utilisés. Cela indique que dans ce climat, le recours au chauffage central n'est pas nécessaire.
- Les conclusions dégagées pour Tunis, sont également valables pour Gabès.

Bizerte

- Les consommations varient du simple au double en cas de chauffage continu.
- Même si l'effet bénéfique de l'agrandissement des vitrages est moins spectaculaire qu'ailleurs, il permet quand même à Bizerte de satisfaire environ le quart de la charge thermique.
- D'un point de vue économique, toutes les variantes améliorées qui n'ont pas de plancher lourd, sont plus rentables que le cas de référence.
- Lorsque les vitrages sont agrandis, l'utilisation d'équipements de chauffage léger permet d'assurer un confort globalement acceptable (*de 71.2 à 77.6/100 suivant les variantes*) à l'étage supérieur et encore meilleur (*de 76.2 à 82.7/100*) à l'étage intermédiaire. Cela signifie que le chauffage central n'est pas nécessaire pour les étages intermédiaires s'ils bénéficient de parois isolées et de vitrages agrandis, mais demeure nécessaire à l'étage supérieur si un confort supérieur à 80/100 est exigé.

Jendouba et Gafsa

- En cas de chauffage central, les consommations varient plus que du simple au double.
- L'agrandissement des vitrages permet de satisfaire environ le tiers de la charge de chauffage.
- D'un point de vue économique, toutes les variantes améliorées qui n'ont pas de plancher lourd, sont plus rentables que le cas de référence.
- Avec de grands vitrages, les équipements de chauffage léger permettent d'assurer un confort globalement acceptable à l'étage supérieur, et encore meilleur à l'étage intermédiaire.

A Gafsa, la meilleure variante (*53 à l'étage supérieur, et 43 à l'étage intermédiaire*) permet d'obtenir pratiquement 80/100 à l'étage supérieur et 85/100 à l'étage intermédiaire.

A Jendouba, elle permet d'atteindre 77/100 pour le premier, et 83/100 pour le second. Cela signifie qu'à Gafsa on pourra se passer de chauffage central pour tous les étages, moyennant l'adoption de toutes les améliorations architecturales.
A Jendouba, on pourra s'en passer dans les étages intermédiaires; à l'étage supérieur, cela devrait être possible moyennant une couche d'isolation sur la toiture plus forte que celle qui a été adoptée.

Bâtiments chauffés et climatisés

Les concepteurs de bâtiments, destinés à être chauffés et climatisés, trouveront ci-dessous des recommandations, en fonction de la région d'implantation de leur bâtiment.

Tunis

- Energie de chauffage :
  Les améliorations architecturales permettent d'économiser environ 60% de l'énergie de chauffage, par rapport à la variante la plus mauvaise. L'agrandissement des vitrages permet à lui seul d'économiser le quart de cette énergie. Dans ce cas de chauffage continu, l'isolation de la toiture est très bénéfique : seule, elle permet d'économiser 21% de l'énergie de chauffage (presque autant que les vitrages). L'isolation des murs est également bénéfique (économie = 11%) dans ce cas, quoique moins que celle de la toiture.
- Energie de climatisation :
  Là aussi, le potentiel d'économies d'énergie est très important : de l'ordre de 2/3 environ; l'isolation de la toiture à elle seule, permet une telle économie. L'agrandissement des vitrages est défavorable et accroît la charge de climatisation (on garde les volets ouverts). Le rôle de l'isolation des murs est assez mitigé, étant favorable en période de jour, mais défavorable la nuit; globalement, dans le climat de Tunis, les deux effets sont du même ordre de grandeur.
- Rentabilité économique globale :
  L'isolation de la toiture est sans conteste, la mesure la plus rentable. L'isolation des murs est toujours rentable, en présence ou en l'absence des autres éléments d'amélioration. La double cloison avec lame d'air est la solution la moins rentable (moins que la simple cloison). La solution " toiture isolée et simple cloison " est plus rentable pour l'étage supérieur, que la double cloison sans isolation de la toiture. L'agrandissement des vitrages n'est rentable qu'en cas de chauffage électrique. En cas de chauffage à gaz, (et quel que soit le taux d'enchérissement du gaz), il n'est pas rentable, le surcoût d'énergie de climatisation qu'il entraîne étant plus important que la réduction d'énergie de chauffage. La solution est alors d'utiliser des brise-soleil qui occulteraient les rayons solaires d'été, mais pas ceux d'hiver.
  Remarquons au passage que c'est à Tunis (pour les données météo utilisées dans cette étude) que les coûts globaux sont les moins élevés.

Bizerte

- Energie de chauffage :
  On peut réduire la facture de chauffage de moitié en améliorant la qualité thermique du bâti. L'agrandissement des vitrages permet une économie de 15% environ (moins qu'à Tunis, à cause de l'ensoleillement plus faible). L'isolation de la toiture est particulièrement efficace dans ce climat (du fait que l'atténuation de l'irradiation solaire qu'elle transmet, est moins importante) : avec 24% d'économie, elle est même plus intéressante que l'agrandissement des vitrages. L'isolation des murs permet une économie d'énergie de 9% environ (moins que les vitrages, et bien moins que la toiture).
- Energie de climatisation :
  Le potentiel d'économies d'énergie atteint là aussi les deux tiers; l'isolation de la toiture à elle seule, permet une économie de 62%. L'agrandissement des vitrages est défavorable. L'isolation des murs est favorable seulement si la toiture est isolée.
- Rentabilité économique globale :
  L'isolation de la toiture est extrêmement rentable. L'isolation des murs est raisonnablement rentable ; là aussi, la double cloison avec lame d'air est moins rentable que la simple cloison. L'augmentation de l'inertie du plancher n'est jamais rentable; l'agrandissement des vitrages non plus.
  Pour l'étage supérieur, toutes les variantes avec toiture isolée sont nettement plus rentables que le cas de référence. Pour l'étage intermédiaire, les variantes où l'on change la composition des murs seulement (mur isolé ou simple cloison) sont plus rentables que le cas de référence. Cela est d'ailleurs vrai pour les 5 localités.

Gabès

- Energie de chauffage :
  L'amélioration de la qualité des logements permet de réduire la consommation de cette énergie des deux tiers environ. L'agrandissement des vitrages permet une économie particulièrement substantielle, de l'ordre de 30%. L'isolation de la toiture est bénéfique (économie de 11%), mais moins qu'ailleurs, car l'atténuation du rayonnement solaire transmis est importante. L'isolation des murs est plus bénéfique que celle de la toiture (économie de 13%).
- Energie de climatisation :
  L'amélioration de la qualité du bâti permet là aussi de diviser la consommation d'énergie par trois. A elle seule, l'isolation de la toiture permet une économie de 56%. Comme partout, l'agrandissement des vitrages entraîne une surconsommation de climatisation. Quand la toiture est

l'isolation des murs est bénéfique ; quand elle ne l'est pas, la composition des murs est pratiquement indifférente (la charge est la même dans le cas des 3 compositions de murs).

- Rentabilité économique globale :
Les tendances pour la rentabilité sont les mêmes, quel que soit le scénario d'évolution des prix de l'énergie. L'isolation de la toiture est extrêmement rentable; celle du plancher absolument pas; celle de l'agrandissement des vitrages, non plus, dans les conditions de cette étude.
Globalement, les coûts intégrés pour Bizerte et pour Gabès sont très proches (ils sont plus élevés qu'à Tunis, et moins qu'à Gafsa et Jendouba); cependant, les coûts de chauffage sont nettement plus élevés à Bizerte, et ceux de climatisation à Gabès.

Jendouba

- Energie de chauffage :
Dans ce climat assez froid l'hiver, l'amélioration du bâti peut permettre d'économiser la moitié environ de l'énergie de chauffage; l'agrandissement des vitrages peut entraîner à lui seul, une économie de 18%. Ici, comme à Bizerte (et pour la même raison), l'isolation de la toiture est particulièrement efficace, entraînant une économie de 23%. L'isolation des murs est bénéfique (économie de 9%), mais bien moins que celle de la toiture.
- Energie de climatisation :
L'amélioration du bâti permet d'économiser 60% environ de cette énergie. L'isolation des murs est très légèrement bénéfique, quel que soit l'état des autres éléments.
- Rentabilité économique globale :
L'isolation de la toiture est la seule mesure dont la rentabilité est importante; celle des murs est rentable, mais très faiblement.

Gafsa

- Energie de chauffage :
L'amélioration du bâti permet une économie un peu plus substantielle qu'à Jendouba, de l'ordre de 57%, l'agrandissement des vitrages étant responsable à lui seul d'une économie de 22%, l'isolation de la toiture de 21%. Ces deux mesures sont donc d'une efficacité comparable. L'isolation des murs, qui permet, seule, une économie de 10% est bénéfique, mais moins que les deux mesures précédentes.

- Energie de climatisation :
  Les éléments d'amélioration peuvent entraîner la réduction de 55% de la charge, l'isolation de la toiture à elle seule permettant une atténuation de 49%. Quand la toiture est isolée, les murs isolés sont plus favorables que la double cloison, elle-même plus favorable que la simple cloison.

- Rentabilité économique globale :
  Comme toujours, l'isolation de la toiture est extrêmement rentable; l'inertie du plancher et l'agrandissement des vitrages ne le sont pas. L'isolation des murs est rentable; la simple cloison est aussi rentable que la double cloison avec lame d'air (cas de référence).

6.3 Choix des paramètres de conception

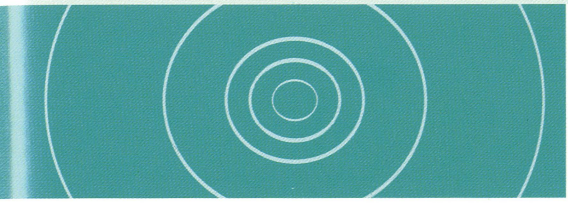
La synthèse des résultats présentés ci-dessus montrent que le choix optimal des paramètres de conception dépend étroitement du mode d'occupation du bâtiment :

- Il s'agit d'abord de savoir s'il sera occupé durant toute l'année ou durant une partie de l'année (*l'isolation de la toiture par exemple est inutile si le bâtiment est inoccupé en saison chaude*).
- Il faut savoir ensuite quel est le niveau de confort requis pour ce bâtiment : confort satisfaisant en permanence **?** confort globalement satisfaisant **?** confort acceptable **?** etc...
- Ce niveau de confort requis (*qui doit tenir compte bien entendu des possibilités financières*) déterminera le mode de gestion du bâtiment :

  - Température fluctuante
  - chauffage intermittent
  - chauffage continu ; pas de climatisation
  - chauffage continu l'hiver et climatisation l'été

C'est seulement en fonction de ces modes de gestion que les choix appropriés des paramètres de conception pourront être effectués, sur la base des recommandations précédentes.

Chapitre 7



Calcul des apports solaires bruts

Nous avons vu au chapitre 3 que les apports gratuits bruts A_b sont la somme des apports internes A_{int} et des apports solaires bruts A_{sb} :

$$A_b = A_{int} + A_{sb} \qquad (7.1)$$

Pour des calculs dans des conditions standard, les apports internes A_{int} seront pris égaux à 100 Wh par jour et par m² habitable.
Les apports solaires bruts A_{sb} dépendent des données d'irradiation solaire, et des caractéristiques du bâtiment, telles que la géométrie, l'importance des vitrages et leur orientation, les revêtements des parois extérieures ...
Ils sont une donnée d'entrée de l'outil simplifié qui a été développé pour le calcul des coefficients réglementaires, et qui sera présenté au chapitre suivant.
Nous avons donc calculé un ensemble de valeurs, que nous présentons ci-dessous sous forme de tableaux, et qui faciliteront le calcul des apports solaires bruts pour leur utilisation dans l'outil simplifié.

7.1 Irradiations sur différents plans verticaux

Plan vertical sud

Nous avons vu au chapitre 3 que la façade la plus intéressante en rapport au soleil est la façade sud. Nous avons alors calculé l'irradiation globale sur un plan vertical sud I_{sud}, intégrée sur :

- la saison d'hiver, définie comme allant de novembre à mars inclus.
- la saison d'été, définie comme allant de juin à septembre inclus.

Les tableaux 7.1 et 7.2 donnent respectivement la valeur de I_{sud} pour chacune des deux saisons, et pour cinq localités tunisiennes. Ces valeurs qui sont cohérentes avec celles du document [1] seront prises comme référence pour le calcul des irradiations sur d'autres plans.

Tableau 7.1 - *Irradiation I_{sud} durant la saison de chauffage sur un plan vertical sud*

Ville	I_{sud} (kWh/m²)
Tunis	500
Gabès	580
Bizerte	480
Jendouba	460
Gafsa	560

Tableau 7.2 - *Irradiation I_{sud} durant la saison de climatisation sur un plan vertical sud*

Ville	I_{sud} (kWh/m²)
Tunis	375
Gabès	360
Bizerte	350
Jendouba	340
Gafsa	385

Plan horizontal et plans d'orientations variées

Pour le calcul des apports solaires reçus par un plan horizontal (la toiture) ou par des façades autres que la façade sud, on utilisera un coefficient d'orientation et d'inclinaison C1, défini comme étant :

$$C1 = \frac{\textit{Irradiation saisonnière sur ce plan}}{\textit{Irradiation saisonnière sur un plan vertical sud}}$$

Le plan horizontal a été découpé en 16 sous-secteurs, eux-mêmes regroupés en 5 secteurs principaux, grâce à la symétrie de la trajectoire solaire autour de l'axe Nord - Sud. La figure 7.1 précise la définition de ces secteurs.

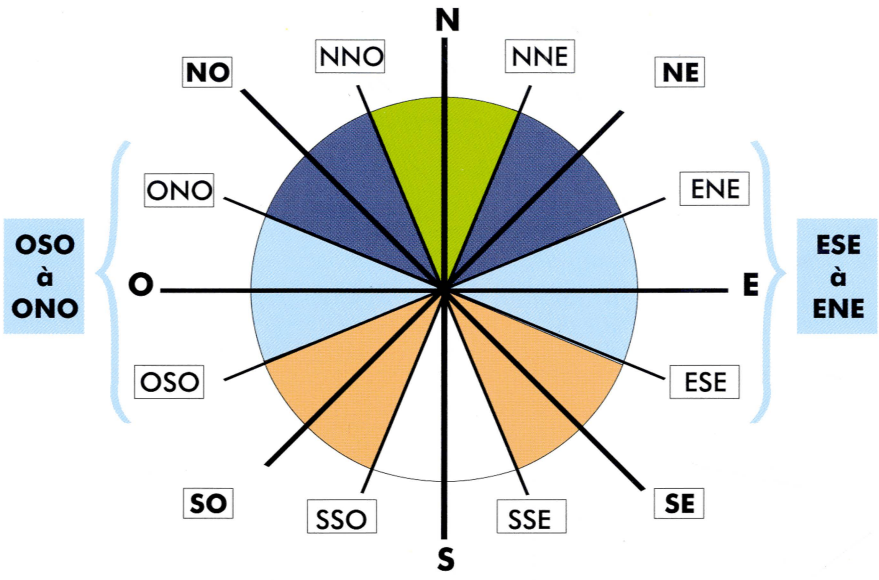


Figure 7.1 - Définition de cinq secteurs pour l'orientation

Les tableaux 7.3 et 7.4 donnent respectivement pour l'hiver et pour l'été, la valeur de *C1* pour chacun des cinq secteurs d'orientation et pour neuf intervalles concernant l'inclinaison du plan par rapport au plan horizontal. Le plan horizontal correspond à la dernière ligne du tableau.

L'irradiation solaire incidente sur le plan, notée I_{plan}, est alors donnée par :

$$I_{plan} = I_{sud} C1 \qquad (7.2)$$

La valeur de C1 étant celle qui correspond à la saison considérée.

Tableau 7.3 - *Coefficient C1 pour l'hiver*

Inclinaison de la paroi sur l'horizontale, en degrés	Orientation de la paroi				
	SSE à SSO	SSE à ESE et SSO à OSO	ESE à ENE et OSO à ONO	ENE à NNE et ONO à NNO	NNE à NNO
De 88 à 90	1.0	0.80	0.55	0.30	0.25
De 83 à 87	1.05	0.85	0.60	0.30	0.25
De 68 à 82	1.15	0.95	0.65	0.35	0.30
De 53 à 67	1.20	1.05	0.70	0.40	0.30
De 38 à 52	1.20	1.05	0.75	0.45	0.35
De 23 à 37	1.15	1.05	0.80	0.60	0.45
De 8 à 22	1.05	1.0	0.85	0.75	0.65
De 3 à 7	0.95	0.90	0.90	0.85	0.80
De 0 à 2	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

Tableau 7.4 - *Coefficient C1 pour l'été*

Inclinaison de la paroi sur l'horizontale, en degrés	Orientation de la paroi				
	SSE à SSO	SSE à ESE et SSO à OSO	ESE à ENE et OSO à ONO	ENE à NNE et ONO à NNO	NNE à NNO
De 88 à 90	1.00	1.20	1.25	0.95	0.65
De 83 à 87	1.15	1.30	1.30	1.00	0.70
De 68 à 82	1.40	1.50	1.45	1.15	0.80
De 53 à 67	1.70	1.75	1.70	1.35	1.10
De 38 à 52	2.00	2.00	1.85	1.60	1.45
De 23 à 37	2.15	2.15	2.05	1.85	1.80
De 8 à 22	2.25	2.20	2.15	2.10	2.05
De 3 à 7	2.25	2.20	2.20	2.15	2.15
De 0 à 2	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20

7.2 Calcul des facteurs d'ombrage

Le rayonnement solaire réellement reçu par une surface donnée dépend du rayonnement incident I_{plan}, sur le plan de la surface, mais aussi de la présence éventuelle de masques spécialement conçus (*brise-soleil*) pour cela, ou encore faisant partie de l'environnement de cette surface.
La présence de masques dans l'environnement d'un plan récepteur atténue de manière plus ou moins importante **le rayonnement diffus** sur ce plan, suivant l'angle solide sous lequel le plan voit l'obstacle. A un instant précis, **le rayonnement direct** est totalement, ou pas du tout, affecté suivant que l'obstacle se trouve entre le récepteur et le soleil ou non.
Si l'on souhaite évaluer la performance d'un bâtiment sur l'ensemble d'une saison, il est essentiel de pouvoir calculer l'irradiation $I_{reçu}$, réellement reçue par la surface, compte tenue de l'ombre projetée des obstacles aux différents moments de cette saison. Nous considérerons un coefficient d'ombrage ou facteur d'atténuation F_e, défini comme étant :

$$F_e \equiv \frac{\textit{Irradiation reçue en présence d'obstacles}}{\textit{Irradiation reçue en leur absence}} \equiv \frac{I_{reçu}}{I_{plan}} \qquad (7.3)$$

F_e peut être considérée comme le produit de deux coefficients :
- F_{e1} qui tient compte des masques liés au bâtiment
- F_{e2} qui tient compte de ceux liés à l'environnement

$$F_e = F_{e1} F_{e2} \qquad (7.4)$$

Nous avons considéré quatre types d'obstacles liés au bâtiment :
- balcon encastré tout le long d'une façade
- balcon isolé
- brise-soleil horizontal ou incliné sur l'horizontale, surplombant une fenêtre ou une baie vitrée
- mur latéral

Pour chacun de ces obstacles, des simulations horaires ont été effectuées, en considérant la position précise du soleil à ce moment et les valeurs des éclairements direct et diffus pour une journée moyenne du mois considéré.

La valeur du coefficient d'atténuation a alors été calculée comme étant l'irradiation reçue sur l'ensemble de la saison malgré la présence des masques, divisée par l'irradiation incidente durant la même période. Les Annexes A1 et A3 de [13] donnent les valeurs de F_{e1}, calculées respectivement pour la saison d'hiver et pour celle d'été.

Pour les masques liés à l'environnement, nous avons considéré des obstacles de hauteur uniforme, parallèles à la façade étudiée. Le facteur d'atténuation F_{e2} dépend alors de la valeur de l'angle sous lequel la surface réceptrice voit le sommet de l'obstacle. Il a été calculé suivant l'approche utilisée pour les masques liés au bâtiment. Les Annexes A2 et A4 de [13] donnent les valeurs de F_{e2} pour différents angles et pour chacune des deux saisons.
Après avoir déterminé F_{e1} et F_{e2}, on calcule $I_{reçu}$:

$$I_{reçu} = F_e I_{plan} = F_{e1} F_{e2} I_{plan} \qquad (7.5)$$

7.3 Apports solaires bruts à travers une fenêtre

Le rayonnement solaire qui pénètre dans le bâtiment à travers une fenêtre dépend du coefficient de transmission solaire moyen $\overline{\tau}$, de la présence de rideaux et de voilages qui ne seront pas toujours ouverts, et aussi de la fraction de la fenêtre qui est occupée par la menuiserie, ainsi que de l'ombre portée du mur qui contient la fenêtre, et qui est différente suivant que le vitrage est placé au nu intérieur ou au nu extérieur de la fenêtre.
On considérera alors que l'énergie transmise par unité de surface de la fenêtre sera donnée par :

$$I_{trans} = F_{fs} I_{reçu} \qquad (7.6)$$

F_{fs} étant le facteur de transmission de la fenêtre donné par :

$$F_{fs} = VL \qquad (7.7)$$

Le coefficient *V* tient compte du fait que les rideaux ne sont pas toujours ouverts durant la journée. On prendra pour valeur 0,85 pour l'hiver, 0,40 pour l'été pour des fenêtres au Sud à l'Est ou à l'Ouest, et 0,9 pour des fenêtres au Nord.
L est le facteur solaire de la paroi qui tient compte du coefficient de transmission solaire moyen, de la présence de parties opaques (*menuiserie*) dans la surface de la fenêtre, et de l'ombre portée du mur qui contient cette fenêtre. Le tableau 7.5 donne les valeurs de *L* pour différents types de fenêtres et de menuiseries. Dans le cas où le type de menuiserie n'est pas connu, on pourra prendre pour *L* une valeur moyenne de 0,55.

Tableau 7.5 *- Valeurs du facteur solaire L*

MENUISERIE	PAROI	VITRAGE	Position	
			Au nu intérieur	Au nu extérieur
En bois, battante ou coulissante	Fenêtre	Simple	0,51	0,56
		Double	0,44	0,48
	Porte-fenêtre sans soubassement	Simple	0,53	0,59
		Double	0,46	0,51
	Porte-fenêtre avec soubassement	Simple	0,46	0,51
		Double	0,40	0,44
Métallique, coulissante	Fenêtre	Simple	0,58	0,64
		Double	0,50	0,55
	Porte-fenêtre sans soubassement	Simple	0,60	0,67
		Double	0,52	0,58
Métallique, battante	Fenêtre	Simple	0,54	0,60
		Double	0,47	0,52
	Porte-fenêtre sans soubassement	Simple	0,56	0,62
		Double	0,48	0,53

Pour une fenêtre *i* de surface S_i, les apports solaires bruts A_{sbi} seront donnés par

$$A_{sbi} = S_i F_{tsi} F_{ei} Cl_i I_{sud} \qquad (7.8)$$

avec

$$F_{tsi} = VL_i \qquad (7.9)$$

7.4 Apports solaires bruts à travers une paroi opaque

Etant donné l'importance du rayonnement solaire dans notre région, les apports solaires sur les parois opaques ne peuvent pas être négligés, particulièrement en saison chaude, où l'éclairement solaire de la toiture est responsable d'une part importante des besoins de climatisation.

Notion de température équivalente au soleil

Considérons une paroi opaque de surface A en contact avec l'ambiance extérieure de température T_e et soumise à un éclairement solaire $\dot{I}$ sur sa face externe. On peut facilement montrer que le flux net Q qui pénètre dans le bâtiment à travers la paroi est donné par :

$$Q = K\,A\,(T_e - T_i) + K\,A\,\frac{\alpha}{h_e}\,\dot{I} \qquad (7.10)$$

α étant le coefficient d'absorption de la surface externe de la paroi, h_e son coefficient d'échanges superficiels externe, et K son coefficient de transmission global.
On voit ainsi que les apports solaires instantanés sont donnés par :

$$\dot{A}_{sb} = K A \frac{\alpha}{h_e}\,\dot{I} \qquad (7.11)$$

Ce flux Q est le même que celui qui traverserait une paroi en contact avec une ambiance extérieure à la température T_{es} telle que :

$$T_{es} = T_e + \frac{\alpha}{h_e}\,\dot{I} \qquad (7.12)$$

en l'absence d'ensoleillement. La température T_{es} est appelée **température équivalente au soleil**. La figure 7.2 illustre les deux situations équivalentes.

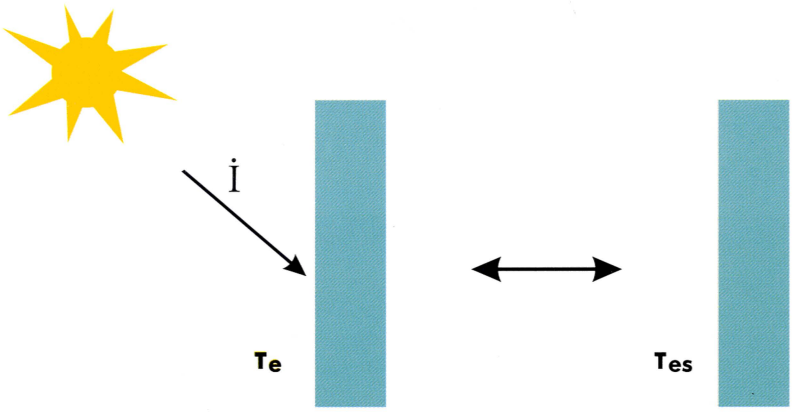


Figure 7.2 - Température équivalente au soleil

En intégrant l'équation (7.11) sur l'ensemble d'une saison, on voit qu'on peut calculer l'énergie solaire transmise I_{trans} par unité de surface de cette paroi comme étant :

$$I_{trans} = K \frac{\alpha}{h_e} I_{reçu} \qquad (7.13)$$

$I_{reçu}$ étant l'irradiation solaire reçue par la paroi compte tenu des masques éventuels. Pour une paroi i de surface S_i, on pourra écrire :

$$A_{sbi} = S_i K_i \frac{\alpha_i}{h_{ei}} I_{reçu,i} \qquad (7.14)$$

ou encore :

$$A_{sbi} = S_i F_{tsi} F_{ei} Cl_i I_{sud} \qquad (7.15)$$

avec

$$F_{tsi} = K_i \frac{\alpha_i}{h_{ei}} \qquad (7.16)$$

7.5 Synthèse du calcul des apports solaires

Pour l'ensemble du bâtiment, les apports solaires A_{sb} se calculent par la formule suivante :

$$A_{sb} = (\sum_i S_i F_{tsi} F_{ei} C1_i) I_{sud} \qquad (7.17)$$

dans laquelle :

S_i = surface de la paroi *i* (fenêtre ou paroi opaque)

I_{sud} = irradiation sur le plan vertical sud, en l'absence d'ombrage, durant la saison considérée (donnée par un tableau pour chaque site climatique).

$C1_i$ est le coefficient d'orientation et d'inclinaison, qui est le rapport de l'irradiation sur le plan de la paroi, à celle sur un plan vertical sud ; sa valeur est donnée dans des tableaux, valable pour toute la Tunisie.

F_{ei} est le facteur d'atténuation du rayonnement solaire ; il est égal au rapport entre l'irradiation réelle reçue sur la paroi, à celle qui serait reçue sans aucun masque.

$$F_{ei} = F_{e1i} F_{e2i} \qquad (7.4)$$

F_{e1i} exprimant les effets des obstacles liés au bâtiment.

F_{e2i} ceux des obstacles liés à l'environnement.

F_{tsi} est le facteur de transmission solaire de la paroi, c'est-à-dire la proportion d'énergie solaire incidente qui pénètre dans le logement.

Pour une paroi opaque :

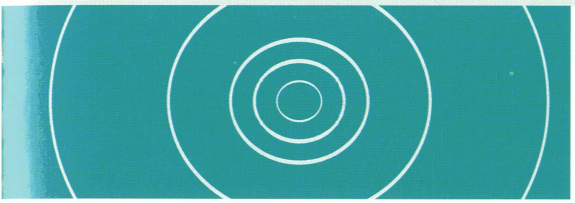
$$F_{tsi} = \alpha_i \frac{K_i}{h_{ei}} \qquad (7.16)$$

Pour les calculs réglementaires des coefficients de performance, la valeur de α_i est fixée à 0,3 pour les murs verticaux et à 0,5 pour la toiture.

Pour une paroi vitrée :

$$F_{tsi} = V_i L_i \qquad (7.9)$$

Chapitre 8



Méthode CHEOPS pour le calcul des besoins énergétiques

Nous présentons dans ce chapitre la définition de deux coefficients réglementaires *H* et *E* permettant d'évaluer la qualité d'un projet architectural durant les saisons froide et chaude, ainsi qu'un outil simplifié qui a été spécialement développé pour le calcul des besoins de chauffage et de climatisation dans les conditions tunisiennes, et qui permet de ce fait l'évaluation simple des deux coefficients ci-dessus cités. Nous décrivons ci-dessous les étapes de cette méthode de **C**alcul de **H** et **E** par un **O**util **P**aramétrique **S**implifié, dite méthode **CHEOPS**.

Nous avons vu au chapitre 3 que les besoins réels en énergie de chauffage C_{ch} peuvent être calculés par :

$$C_{ch} = C_{0h} - A_u \qquad (8.1)$$

C_{0h} représentant les déperditions sur la saison froide, compte tenu du régime dynamique, et A_u représentant la part des apports gratuits utiles. De même, en saison chaude, les besoins réels en énergie de climatisation C_{clim} s'écrivent :

$$C_{clim} = C_{0e} + A_{eff} \qquad (8.2)$$

C_{0e} représentant la transmission de chaleur due à la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur, et compte tenu du régime dynamique, et A_{eff} représentant la part des apports gratuits qui contribuent à susciter des besoins de rafraîchissement. Le calcul des grandeurs C_{0h}, C_{0e}, A_u et A_{eff} n'est pas simple, du fait que les transferts de chaleur se font en régime dynamique. **L'idée de l'outil simplifié est alors de calculer ces grandeurs à partir de corrélations basées sur d'autres grandeurs plus simples à calculer**.
Pour établir ces corrélations, nous avons eu recours à la simulation horaire et détaillée, à l'aide du logiciel TRNSYS [16] d'un très grand nombre de variantes de bâtiments [12], ayant des parois extérieures plus ou moins lourdes, mais non pourvus de cloisons intérieures.

8.1 Constante de temps des bâtiments

La relation entre déperditions en régime dynamique et en régime permanent, ainsi que la part des apports solaires bruts qui est utile ou effective, dépendent de l'importance de l'inertie du bâtiment.
La constante de temps τ_{bat} du bâtiment est souvent utilisée pour représenter l'inertie, notamment dans la norme européenne [14]. Son estimation passe par le calcul de la capacité intérieure C_{int} [15] de chaque paroi. Nous avons vu au chapitre 2 que la constante de temps τ d'une paroi indique la rapidité avec laquelle la paroi réagit

aux variations des conditions ambiantes. Lorsqu'il s'agit des variations des conditions ambiantes intérieures, τ est définie comme étant :

$$\tau = C_{\text{int}} R = \frac{C_{\text{int}}}{K}$$

R étant la résistance thermique surfacique de la paroi, et K son coefficient de transmission thermique.
Pour un bâtiment entier, on remplacera K par le produit GV du bâtiment, et C_{int} de la paroi par la capacité intérieure du bâtiment, calculée comme étant la somme des valeurs C_{int} des différentes parois, pondérées par leurs surfaces.

$$C_{\text{int},tot} = \sum_i C_{\text{int},i} A_i \qquad (8.3)$$

La constante de temps du bâtiment tout entier est alors calculée comme étant :

$$\tau_{bat} = \frac{C_{\text{int},tot}}{GV} \qquad (8.4)$$

8.2 Besoins en énergie de chauffage pour T_{ch} = 20°C

Le calcul des besoins en énergie de chauffage pourra être fait pour deux valeurs différentes de la température de consigne :

- **T_{ch} = 20°C** ; c'est la valeur qui sera considérée pour des logements équipés d'une installation de chauffage.
- **T_{ch} = 16°C** ; c'est la valeur qui sera considérée pour le calcul de H dans le cas de logements non équipés d'une telle installation.

Ce paragraphe traite du calcul de la charge dans le premier cas ; la méthode de calcul dans le deuxième cas fait l'objet du paragraphe 8.4.

Charges en l'absence d'apports solaires

Ces charges sont dues uniquement à la différence de température entre les ambiances intérieure et extérieure. Pour estimer leur valeur en régime dynamique, nous utiliserons des corrélations basées sur ces charges évaluées en régime permanent, qui sont très faciles à calculer. Ainsi, il s'agit de trouver des expressions de C_{0h} en fonction de D_h, les déperditions en hiver, calculées sur la base d'un régime permanent par la formule:

$$D_h = G\,V\,DH_f^+ \qquad (8.5)$$

G étant le coefficient de déperditions volumiques du bâtiment, V son volume, DH_f^+ les degrés-heures froids (ou de chauffage) définis au chapitre 5 (équation 5.2).

Le tableau 8.1 donne les valeurs de DH_f^+ (sur la base de 20°C) à utiliser dans l'expression précédente.

Tableau 8.1 *- Degrés-heures froids DH_f^+ (°C.h) (Tch = 20°C)*

Ville	DH_f^+
Tunis	25 400
Bizerte	27 000
Gabès	19 400
Jendouba	30 900
Gafsa	29 100

Pour trouver la corrélation qui lie C_{0h} aux déperditions en régime permanent, il nous fallait déterminer par simulation dynamique les valeurs de C_{0h} pour un grand nombre de bâtiments et de données climatiques. Chaque variante de bâtiment a donc fait l'objet de deux simulations :

- l'une dans des conditions réalistes (soleil, apports internes) pour trouver C_{ch}
- l'autre en annulant les apports solaires et internes pour trouver C_{0h}.

Pour la **saison de chauffage**, l'analyse des résultats nous a permis de trouver des corrélations de la forme :

$$C_{0h} = a_1 D_h - a_2 D_h^2 \qquad (8.6)$$

Le tableau 8.2 donne les valeurs des coefficients a_1 et a_2.

Tableau 8.2 *- Valeurs des coefficients a_0 et a_1*

a_1	a_2 (Wh)$^{-1}$
0,96	$7{,}2 \cdot 10^{-10}$

On voit ainsi que l'hiver, les déperditions en régime dynamique sont légèrement inférieures à celles qui sont calculées sur la base du régime permanent.

Calcul des apports gratuits utiles normalisés

Rappelons qu'en saison de chauffage, les apports gratuits bruts se subdivisent en apports gratuits utiles A_u et apports qui causent des surchauffes A_{surch}.

$$A_b = A_u + A_{surch} \qquad (8.7)$$

Seule la quantité A_u intervient dans la détermination des besoins énergétiques. Le calcul de cette quantité n'est pas simple, car elle dépend de l'importance des apports gratuits instantanés par rapport aux déperditions instantanées tout le long de la saison, et aussi de l'inertie du bâtiment. Les résultats des deux simulations réalisées pour chaque bâtiment nous a permis d'évaluer la part des apports utiles qui n'est autre que la différence entre les besoins énergétiques des simulations sans apports gratuits et avec apports.
Nous avons alors recherché des corrélations liant ces apports utiles A_u aux apports gratuits bruts A_b, dont le calcul est simple, et a été détaillé au chapitre 7.
Cependant, la part des apports utiles dépend de l'importance des apports gratuits bruts par rapport aux déperditions du bâtiment. Nous normalisons alors les apports gratuits en définissant deux grandeurs adimensionnelles :

- les **apports gratuits bruts normalisés** par les déperditions, appelés *X* :

$$X \equiv \frac{A_b}{D_{ref}} \qquad (8.8)$$

  D_{ref} étant des déperditions de référence

- les **apports gratuits utiles normalisés** par la même quantité, et que nous désignons par *F* :

$$F \equiv \frac{A_u}{D_{ref}} \qquad (8.9)$$

  Les meilleures corrélations ont été obtenues pour une charge D_{ref} définie comme étant les déperditions en régime permanent des **parois opaques uniquement** :

$$D_{ref} = D_{op} = \left(\sum_i A_i K_i + 0{,}34\, N\, V \right) DH_f^+ \qquad (8.10)$$

  Nous avons donc établi des corrélations entre *F* et *X* de la forme :

$$F = b\,X - c\,X^2 \qquad (8.11)$$

Le coefficient *b* lui-même étant une fonction de la constante de temps τ suivant la loi :

$$b = b_0 + b_1\tau - b_2\tau^2 \qquad (8.12)$$

Les valeurs des coefficients c, b_0, b_1 et b_2 des équations (8.11) et (8.12) sont données dans le tableau 8.3.

Tableau 8.3 - *Valeurs des coefficients b et c*

b_0	b_1 (h^{-1})	b_2 (h^{-2})	c
0,57	0,008	0,00006	0,015

Calcul des besoins en énergie de chauffage

Les besoins en énergie de chauffage étant donnés par :

$$C_{ch} = C_{0h} - A_u \qquad (8.13)$$

il devient très facile de les évaluer une fois que C_{0h} et *F* ont été calculés, par la formule suivante :

$$C_{ch} = C_0 - FD_{op} \qquad (8.14)$$

8.3 Besoins en énergie de climatisation

Le calcul des besoins en énergie de climatisation pourra être fait pour deux valeurs différentes de la température de consigne :

- T_{cs} **= 26°C** ; c'est la valeur qui sera considérée pour des logements équipés de climatiseurs.
- T_{cs} **= 28°C** ; c'est la valeur qui sera considérée pour le calcul de *E* dans le cas de logements non équipés de climatiseurs.

Ce paragraphe traite simultanément du calcul de la charge dans les deux cas.

Charge de climatisation en l'absence d'apports solaires

Rappelons que ces charges sont dues uniquement à la différence de température entre les ambiances intérieure et extérieure. Pour estimer leur valeur C_{e*} en régime dynamique, nous utiliserons des corrélations basées sur ces charges évaluées en régime permanent, D_e, qui sont données par :

$$D_e = G\,V\,DH_c^+ \qquad (8.15)$$

DH_c^+ étant les degrés-heures chauds définis au chapitre 5 (équation 5.4).

Les tableaux 8.4 et 8.5 donnent les valeurs de DH_c^+ à utiliser dans l'expression précédente, respectivement pour des températures de consigne de 26°C et de 28°C.

***Tableau 8.4** - Degrés-heures chauds (°C.h) pour $T_{c*} = 26°C$*

Ville	DH_c^+
Tunis	4 700
Bizerte	3 600
Gabès	5 200
Jendouba	7 800
Gafsa	10 100

***Tableau 8.5** - Degrés-heures chauds (°C.h) pour $T_{c*} = 28°C$*

Ville	DH_c^+
Tunis	1300
Bizerte	------
Gabès	------
Jendouba	------
Gafsa	------

Là encore, pour trouver la corrélation qui lie C_{e*} aux déperditions en régime permanent, il nous fallait déterminer par simulation dynamique les valeurs de C_{e*} pour un grand nombre de bâtiments et de données climatiques. Chaque variante de bâtiment a donc fait l'objet de deux simulations :

- l'une dans des conditions réalistes (*soleil, apports internes*) pour trouver C_{clim}
- l'autre en annulant les apports solaires et internes pour trouver C_{0e}.

Les corrélations qui ont été obtenues entre C_{0e} et D_e sont de la forme:

$$C_{0e} = d\,D_e + e\,D_e^2 \qquad (8.16)$$

D_e étant exprimée en Wh. Les coefficients *d* et *e* sont les mêmes pour les deux températures de consigne. Ils sont donnés par le tableau 8.6.

Tableau 8.6 - *Valeurs des coefficients d et e*

d	e (Wh)$^{-1}$
0,25	$3{,}6.10^{-4}$

L'application de la corrélation montre cette fois que la charge C_{0e} est beaucoup plus faible (de 3 à 4 fois) que les déperditions D_e en régime permanent. Cette atténuation de la charge en régime dynamique l'été, est due au fait qu'en cette saison, la température extérieure se situe de part et d'autre de la température de consigne (26°C ou 28°C), étant supérieure à celle-ci durant le jour, et inférieure durant la nuit. Le sens du flux de chaleur s'inverse alors, ce qui permet à la structure du bâtiment de stocker les " *frigories* " accumulées la nuit et de les restituer durant le jour, atténuant ainsi la charge de climatisation.

Calcul des apports gratuits effectifs normalisés

Durant l'été, une partie des apports gratuits bruts cause une élévation de température, jusqu'à atteindre la température de consigne; cette partie A_c ne se traduit pas par un besoin de climatisation. L'autre partie A_{eff}, produirait effectivement des dépassements de température, et doit intervenir dans le calcul de la charge de climatisation. Ainsi :

$$A_b = A_{eff} + A_c \qquad (8.17)$$

Le calcul de la quantité A_s n'est pas simple, car elle dépend de l'importance des apports gratuits instantanés par rapport aux flux dus à la différence de température entre intérieur et extérieur, tout le long de la saison, et aussi de l'inertie du bâtiment. Les résultats des deux simulations réalisées pour chaque bâtiment nous a permis d'évaluer la part des apports effectifs qui n'est autre que la différence entre les besoins énergétiques des simulations avec apports gratuits et sans apports.

Nous avons alors recherché des corrélations liant ces apports effectifs $A_{s,eff}$ aux apports gratuits bruts A_s.
Comme pour la saison de chauffage, nous définissons deux grandeurs adimensionnelles :

- les **apports gratuits bruts normalisés** par les déperditions, appelés *X* :

$$X \equiv \frac{A_b}{D_{ref}} \qquad (8.18)$$

D_{ref} étant des déperditions de référence

- les **apports gratuits effectifs normalisés** par la même quantité, et que nous désignons par facteur de surchauffe *S* :

$$S \equiv \frac{A_{eff}}{D_{ref}} \qquad (8.19)$$

Là encore, les meilleures corrélations ont été obtenues pour la charge D_{ref} définie comme étant les déperditions en régime permanent des parois opaques uniquement :

$$D_{ref} = D_{op} = \left(\sum_i A_i K_i + 0{,}34\, NV \right) DH_c^+ \qquad (8.20)$$

Nous avons donc établi des corrélations entre *S* et *X* de la forme :

$$S = f X \qquad (8.21)$$

Le coefficient *f* lui-même étant une fonction de la constante de temps τ suivant la loi :

$$f = f_0 + f_1 \tau - f_2 \tau^2 \qquad (8.22)$$

Les valeurs des coefficients f_0, f_1 et f_2 de l'équation (8.22) sont différentes pour les deux températures de consigne ; elles sont données dans le tableau 8.7.

Tableau 8.7 - *Valeurs des coefficients f*

	f_0	f_1 (h^{-1})	f_2 (h^{-2})
Tc = 26°C	0,253	0,0172	$2,5.10^{-4}$
Tc = 28°C	0,218	0,0004	3.10^{-4}

Calcul des besoins en énergie de climatisation

Les besoins en énergie de climatisation étant donnés par :

$$C_{clim} = C_{0e} + A_{eff} \qquad (8.23)$$

il devient très facile de les évaluer une fois que C_{0e} et S ont été calculés, par la formule suivante :

$$C_{clim} = C_{0e} + S.D_{op} \qquad (8.24)$$

8.4 Besoins en énergie de chauffage pour T_{ch} = 16°C

Rappelons que la valeur de la température de consigne qui sera considérée pour le calcul de *H* dans le cas de logements non équipés d'une installation de chauffage est T_{ch} = 16°C. Ce paragraphe traite du calcul de la charge dans ce cas.
La procédure qui va être décrite pour cela est différente des procédures vues aux paragraphes 8.2 et 8.3, car le calcul de la charge de chauffage pour une température de consigne de 16°C, dans un climat tempéré tel que celui de la Tunisie, est une opération délicate qui pose des problèmes particuliers. En effet, les apports solaires arrivent à satisfaire une très grande partie de la charge qui est liée à une température de consigne aussi basse que 16°C. Il s'ensuit que la charge C_{ch} calculée par l'équation (8.1), à savoir :

$$C_{ch} = C_{0h} - A_u$$

est la différence de deux termes (C_{ch} et A_s) qui ont des valeurs beaucoup plus élevées qu'elle. Une incertitude relative réduite et acceptable sur chacun de ces deux termes, a pour résultat une incertitude relative beaucoup plus importante (*et inacceptable*) sur leur différence C_{ch}. Par ailleurs, la charge de chauffage (*pour 16°C*) durant les mois extrêmes de la saison d'hiver (*novembre et mars*) a une valeur vraiment très faible (*et négligeable*) et n'obéit donc pas aux mêmes lois que pour les autres mois.

Pour contourner ces difficultés, nous avons adopté la stratégie suivante :

- Limiter la saison de chauffe pour une température de consigne de 16°C aux trois mois les plus froids, à savoir : Décembre, Janvier et Février.
- Chercher à corréler directement C_{ch} (*normalisée par une charge de référence*) avec un nouveau paramètre qui rend compte de l'importance des apports solaires bruts A_s par rapport à une charge de référence.

L'analyse d'un grand nombre de résultats de simulation pour cette température de 16°C nous a permis de trouver de très bonnes corrélations entre les deux paramètres suivants :

- $\frac{C_{ch}}{D_h}$ d'une part
- $\frac{A_s}{D_h}$ d'autre part

D_h étant la charge de référence qui est en fait la charge en régime permanent, donnée par :

$$D_h = G\,V\,DH_f^+ \qquad (8.25)$$

G étant le coefficient de déperditions volumiques du bâtiment, V son volume, DH_f^+ les degrés-heures froids correspondant à une température de consigne de 16°C, et calculés pour les mois de décembre, janvier et février uniquement.
Le tableau 8.8 donne ces valeurs de DH_f^+ à utiliser dans l'expression précédente.

Tableau 8.8 *- Degrés-heures froids (°C.h) pour Tch = 16°C et les mois de décembre, janvier et février.*

Ville	DH_f^+
Tunis	9200
Bizerte	9900
Gabès	6200
Jendouba	12 900
Gafsa	12 400

Il faut bien noter que les grandeurs qui interviennent dans la corrélation (*à savoir* C_{ch}, A_b *et* D_h) doivent toutes se rapporter à la même période, à savoir les mois de décembre, janvier et février. La procédure de calcul de A_b est bien entendu la même que celle qui a été exposée au chapitre 7, mais les valeurs à prendre pour $I_{...}$ doivent être les valeurs correspondant à la période indiquée (*décembre, janvier et février*). Le tableau 8.9 donne la valeur de $I_{...}$ pour cette période et pour les cinq localités tunisiennes.

Tableau 8.9 *- Irradiation $I_{...}$ durant les mois de décembre, janvier et février sur un plan vertical sud (kWh/m²).*

Ville	$I_{...}$
Tunis	260
Bizerte	240
Gabès	310
Jendouba	230
Gafsa	310

La corrélation que nous avons trouvée entre les deux variables précédemment indiquées est de la forme :

$$\frac{C_{ch}}{D_h} = g - h\,\frac{A_b}{D_h} + k\,(\frac{A_b}{D_h})^2 \qquad (8.26)$$

Le coefficient *h* lui-même étant une fonction de la constante de temps τ suivant la loi :

$$h = h_0 + h_1\,\tau - h_2\,\tau^2 \qquad (8.27)$$

Les valeurs des coefficients g, h_0, h_1, h_2 et *k* des équations (8.26) et (8.27) sont données dans le tableau 8.10

Tableau 8.10 *- Valeurs des coefficients g, h et k*

g	h_0	h_1 (h^{-1})	h_2 (h^{-2})	k
0,775	0,617	0,0041	$1{,}74.10^{-4}$	0,17

Une fois que les grandeurs D_h et $(\frac{C_{ch}}{D_h})$ ont été déterminées par les équations (8.25) et (8.26) respectivement, il devient très facile de calculer C_{ch} :

$$C_{ch} = D_h\,(\frac{C_{ch}}{D_h}) \qquad (8.28)$$

> ***Remarque :***
> ***Dans le cas (exceptionnel) où le calcul fournirait une valeur négative pour C_{ch}, cela signifierait que la vraie valeur de C_{ch} est très petite, et on pourra la considérer comme nulle.***

8.5 Calcul des coefficients réglementaires

La définition de seuils réglementaires ou de seuils pour l'attribution du label ne peut pas porter directement sur les besoins énergétiques du bâtiment, car ceux-ci sont fonction non seulement de la qualité thermique de l'enveloppe, mais aussi de la taille du bâtiment et de la rigueur du climat. Les seuils devraient donc porter sur des coefficients liés aux besoins énergétiques, mais normalisés par rapport à ces deux paramètres . En ce qui concerne la taille du bâtiment, on peut normaliser les besoins par son volume *V*. Reste à trouver un paramètre permettant de normaliser par rapport à la rigueur du climat.

Degrés-heures solaires

Le coefficient *G* représente les déperditions du bâtiment en régime permanent, normalisées par son volume et par les degrés-heures, qui représentent la rigueur du climat sur la base des variations de la température extérieure par rapport à la température de consigne. Dans notre cas, nous avons vu que le rayonnement solaire joue un rôle important dans la détermination des besoins, particulièrement en saison chaude. Il faut donc le faire intervenir dans le paramètre qui représente la rigueur du climat.

Rappelons d'abord que la saison de chauffage ou la saison d'hiver considérée correspond :

- aux mois de novembre à mars si la température de consigne est de 20°C
- aux mois de décembre à février si elle est de 16°C.

La saison de climatisation quant à elle, correspond aux mois de juin à septembre.

Pour le paramètre qui représente la rigueur du climat, nous aurons recours aux degrés-heures solaires, dont la définition s'inspire du concept de température équivalente au soleil (*voir §7.4*). Ce sont les degrés-heures usuels, corrigés pour tenir compte de l'effet de l'irradiation solaire. Les degrés-heures solaires froids *DHS*, sont définis sur la saison de chauffage; ils sont inférieurs aux degrés-heures usuels.

$$DHS_f = DH_f^+ - \beta I_{sud} \qquad (8.29)$$

I_{sud} étant l'intégrale sur la saison d'**hiver** (*soit les mois de novembre à mars pour une température de 20°C, soit ceux de décembre à février pour une température de 16°C*) de l'irradiation solaire sur un plan vertical sud, exprimée en Wh/m².

La valeur de β a été choisie de manière à traduire convenablement l'importance relative des apports solaires par rapport aux déperditions liées aux degrés-heures ; on trouve sur cette base :

$$\beta = 8 \qquad [m^2°C/kW] \qquad (8.30)$$

Les degrés-heures solaires chauds DHS_c sont définis sur la saison de climatisation; ils sont supérieurs aux degrés-heures usuels.

$$DHS_c = DH_c^+ + \gamma . I_{sud} \qquad (8.31)$$

I_{sud} étant l'intégrale sur la saison d'**été** de l'irradiation solaire sur un plan vertical sud, exprimée en kWh/m². En suivant le même principe que pour β, on trouve :

$$\gamma = 17 \qquad [m^2°C/kW] \qquad (8.32)$$

A titre d'exemple, on a donc pour Tunis:

- DHS_f = 21 400 °C.h pour T_{ch} = 20°C
- DHS_c = 11 075 °C.h pour T_{cs} = 26°C.

Coefficients des besoins de chauffage et de climatisation

On appellera *H* le coefficient des besoins en énergie de chauffage, qui n'est autre que les besoins de chauffage C_{ch} (*estimés par les équations (8.14) ou (8.28)*), normalisés par le volume *V* du bâtiment et par les degrés-heures solaires froids DHS_f (*calculés par (8.29)*) :

$$H \equiv \frac{C_{ch}}{V\, DHS_f} \qquad (8.33)$$

De même, on appellera *E* le coefficient des besoins en énergie de climatisation, c'est-à-dire les besoins de climatisation C_{clim} (*estimée par l'équation (8.24)*), normalisés par le volume V du bâtiment et par les degrés-heures solaires chauds DHS_c (*calculés par (8.31)*) :

$$E \equiv \frac{C_{clim}}{V\, DHS_c} \qquad (8.34)$$